

VŠB-Technická univerzita Ostrava

Fakulta stavební

Katedra pozemního stavitelství

Vliv stáří dřeva na jeho vlastnosti

Influence of Wood Age on Its Properties

Autor:

Ing. Pavel Šmíra

Vedoucí disertační práce:

doc. Ing. Jaroslav Solař, Ph.D.

Ostrava 2012

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci s názvem: „VLIV STÁŘÍ DŘEVA NA JEHO VLASTNOSTI“ vypracoval samostatně pod metodickým vedením vedoucího disertační práce s použitím uvedené literatury a zdrojů, které řádně cituji. Souhlasím, aby moje disertační práce byla zveřejněna v souladu s § 47b Zákona č. 111/1998 Sb. Parlamentu České republiky o vysokých školách.

V Ostravě dne

PAVEL ŠMÍRA

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu disertační práce panu doc. Ing. Jaroslavu Solařovi, Ph.D., za cenné rady, připomínky a metodické vedení práce. Za možnost využití zařízení na měření vlastností dřeva a za cenné podněty při diskusích bych rád poděkoval pracovníkům Technické univerzity ve Zvolenu, konkrétně profesorům RNDr. Františku Kačíkovi, Ph.D., Ing. Jozefu Kúdelovi, CSc., a Ing. Igoru Čunderlíkovi, CSc. Upřímné poděkování dále patří panu doc. Ing. Petru Koňasovi, Ph.D., za konzultace a připomínky v oblasti druhotného využití dřeva jako stavebního prvku. V neposlední řadě děkuji Vojenské nemocnici v Olomouci za příležitost využít CT computed tomography a potvrdit tak hypotézy stanovené v cíli práce.

ABSTRAKT

ŠMÍRA, P: *Vliv stáří dřeva na jeho vlastnosti*. Disertační práce. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, Fakulta stavební, 2012.

Disertační práce je zaměřena na porovnání struktury a vlastností dřeva starého řádově ve staletích, které bylo získáno z konstrukcí historických objektů v oblasti Beskyd, se dřevem nedávno pokáceným. Cílem práce je ověření předpokladu, že technické vlastnosti a struktura historicky starého dřeva splňují požadavky na druhotné použití tohoto materiálu ve stavbách - zejména kulturních památek při zachování původních konstrukcí a materiálů a tím historické hodnoty dané památky. Experimentálně je práce rozdělena na dvě části a ověření stanovených cílů je prováděno na jedlovém dřevě (*Abies alba*). První část je zaměřena na analýzu anatomické struktury a chemického složení dřeva různého stáří a na zjištění jeho vybraných fyzikálních a mechanických vlastností. Získané hodnoty jsou v práci porovnány s hodnotami dřeva, které neprošlo procesem stárnutí. Druhá část práce je cíleně zaměřena na analýzu struktury a zjištění uvedených vlastností dřeva tepelně namáhaného. Tepelné zatížení simuluje prostředí, kterému je dřevo vystaveno při horkovzdušné sterilizaci staveb.

Anatomická struktura zkoumaných vzorků dřeva nevykazovala znaky, které by nasvědčovaly, že během procesu stárnutí došlo k morfologickým změnám. Z výsledků chemických analýz vyplynulo, že při procesu stárnutí dřeva nedochází k významných změnám v celulóze, což potvrdily i výsledky pevnostních charakteristik, které se v důsledku degradace celulózy nezhoršily oproti recentnímu dřevu. Experimentální výsledky tedy potvrdily, že na pevnost dřeva nemá vliv přirozené stárnutí, nýbrž sekundární působení biotických činitelů. To může mít různou intenzitu jak u starého dřeva, tak i u dřeva mladšího, záleží na podmínkách, kde se dřevo nacházelo. K výraznému poklesu naopak došlo u obsahu hemicelulóz. Dále byl zjištěn pokles množství terpenů, které mohou sloužit jako atraktanty pro dřevokazný hmyz. Uvedený pokles terpenů je možné považovat za příčinu vyšší odolnosti historických dřevěných konstrukcí vůči některým druhům škůdců.

KLÍČOVÁ SLOVA: jedle (*Abies alba*), struktura dřeva, chemická analýza dřeva, hygroskopicitá, mechanické vlastnosti dřeva, horkovzdušná sanace dřeva.

ABSTRACT

ŠMÍRA, P: *Influence of Wood Age on Its Properties*. Doctoral Thesis. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, Faculty of Civil Engineering, 2012.

The submitted Doctoral thesis focuses on comparing the structure and properties of centuries old wood which was obtained from constructions of historical buildings in the region of the Beskydy Mountains with the recently cut wood. A goal of the thesis is to verify the prerequisite that technical properties and the structure of historically old wood meet the requirements for secondary use of this material in constructions, particularly of cultural monuments, while preserving the original structures and materials and thus the historical value of the respective monument. Experimentally, the thesis is divided to two parts and the verification of the set goals is carried out on fir wood (*Abies alba*). The first part focuses on the analysis of the anatomic structure and chemical composition of wood of different ages and ascertaining its selected physical and mechanical properties. The obtained values are compared with the values of the wood which has not been subject to the aging process in the thesis. The second part purposely focuses on the analysis of the structure and ascertaining the aforementioned properties of thermally stressed wood. A thermal load simulates an environment wood is exposed to at dry-heat sterilisation of constructions.

The anatomic structure of examined samples did not show any signs which would indicate that morphological changes had occurred during the aging process. The results of chemical analyses showed that no significant changes in cellulose occurred during the aging process, which was also confirmed by results of strength tests which did not get worse due to cellulose degradation compared with the recent wood. Experimental results thus confirmed that the wood strength was not influenced by natural aging, but by the secondary action of biotic elements. It can be of various intensity in the old as well as younger wood and depends on conditions which wood was exposed to. There was a significant drop in the content of hemicelluloses. Furthermore, a drop in the quantity of terpenes which can serve as attractants for wood-destroying insects was found. The said drop in terpenes can be considered the reason for a higher resistance of historical wooden structures to some kinds of wood-destroying insects.

KEY WORDS: fir (*Abies alba*), wood structure, wood chemical analysis, hygroscopicity, wood mechanical properties, dry-heat wood maintenance.

Obsah

| | |
|---|-----------|
| 1 ÚVOD..... | 1 |
| 2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU..... | 3 |
| 2.1 ZMĚNA STRUKTURY A CHEMICKÉHO SLOŽENÍ DŘEVA V PROCESU STÁRNUTÍ | 4 |
| 2.1.1 <i>Mikroskopické změny ve stavbě dřeva</i> | 4 |
| 2.1.2 <i>Chemické změny ve stavbě dřeva</i> | 6 |
| 2.2 VLIV STÁRNUTÍ DŘEVA NA JEHO VLASTNOSTI..... | 8 |
| 2.2.1 <i>Změna mechanických vlastností dřeva v čase</i> | 8 |
| 2.2.2 <i>Změny v hygroscopickém chování dřeva v čase</i> | 9 |
| 2.3 STRUKTURA A VLASTNOSTI TERMICKY UPRAVENÉHO DŘEVA | 11 |
| 2.3.1 <i>Změny struktury a chemického složení vlivem vysoké teploty</i> | 12 |
| 2.3.2 <i>Vliv teploty na mechanické vlastnosti dřeva</i> | 14 |
| 2.3.3 <i>Změny ve fyzikálních vlastnostech dřeva</i> | 16 |
| 2.3.4 <i>Přirozená trvanlivost dřeva a biologická odolnost</i> | 17 |
| 2.4 DENDROCHRONOLOGICKÉ DATOVÁNÍ HISTORICKY STARÝCH PRVKŮ..... | 19 |
| 2.4.1 <i>Stavba letokruhu a faktory ovlivňující tloušťkový růst</i> | 20 |
| 2.4.2 <i>Vady dřeva ovlivňující fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva</i> | 21 |
| 3 CÍL PRÁCE..... | 22 |
| 4 MATERIÁL ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ | 24 |
| 4.1 CHARAKTERISTIKA ODEBRANÉHO MATERIÁLU | 25 |
| 4.1.1 <i>Historie a popis míst odběru materiálu</i> | 25 |
| 4.1.1.1 <i>Popis zámku Rychvald</i> | 26 |
| 4.1.1.2 <i>Popis sídla pánů z Bernartic</i> | 26 |
| 4.1.1.3 <i>Popis sýpky u tvrže ve Velké Polomi</i> | 27 |
| 4.2 ODBĚR MATERIÁLU PRO DENDROCHRONOLOGICKÉ DATOVÁNÍ..... | 29 |
| 4.3 PŘÍPRAVA VZORKŮ PRO ZJIŠTĚNÍ SORPČNÍCH VLASTNOSTÍ DŘEVA..... | 30 |
| 4.4 PŘÍPRAVA VZORKŮ PRO MIKROSKOPICKOU ANALÝZU DŘEVA | 30 |
| 4.4.1 <i>Makroskopický popis vzorků</i> | 31 |
| 4.5 PŘÍPRAVA VZORKŮ PRO CHEMICKOU ANALÝZU | 37 |
| 4.5.1 <i>Příprava vzorků pro stanovení množství uvolněných terpenů</i> | 37 |
| 4.5.2 <i>Příprava vzorků pro určení změny jedlového dřeva během jeho stárnutí</i> | 38 |
| 4.6 PŘÍPRAVA VZORKŮ PRO MECHANICKÉ ZKOUŠKY | 38 |
| 4.7 PŘÍPRAVA VZORKŮ PRO TEPELNou DEGRADACI DŘEVA | 39 |
| 5 METODY PRÁCE..... | 40 |
| 5.1 METODA DENDROCHRONOLOGICKÉHO DATOVÁNÍ..... | 40 |
| 5.1.2 <i>Použitá standardní chronologie a srovnávací letokruhové řady</i> | 41 |
| 5.2 METODA STANOVENÍ SORPČNÍCH VLASTNOSTÍ DŘEVA | 42 |
| 5.3 METODA HODNOCENÍ STRUKTURY DŘEVA | 44 |
| 5.4 METODA CHEMICKÉ ANALÝZY DŘEVA..... | 48 |

| | |
|---|------------|
| 5.4.1 Stanovení uvolněných terpenů při dlouhodobém používání a termické ochraně dřeva | 48 |
| 5.4.2 Analýza chemické změny jedlového dřeva během jeho stárnutí | 50 |
| 5.5 METODA MĚŘENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ DŘEVA | 53 |
| 5.6 Metoda tepelné degradace dřeva v závislosti na věku | 60 |
| 5.7 POUŽITÉ STATISTICKÉ ANALÝZY | 63 |
| 5.7.1 Statistická analýza pro zpracování dat z dendrochronologického datování. 64 | |
| 6 VÝSLEDKY | 67 |
| 6.1 DENDROCHRONOLOGICKÉ DATOVÁNÍ KONSTRUKČNÍCH PRVKŮ | 67 |
| 6.1.1 Datace konstrukčních dřevěných prvků zámku Rychvald | 67 |
| 6.1.2 Datace konstrukčních dřevěných prvků domu v Palkovicích | 70 |
| 6.1.3 Datace konstrukčních prvků sýpky ve Velké Polomi | 72 |
| 6.1.4 Datace konstrukčních dřevěných prvků domu v Bernarticích..... | 74 |
| 6.1.5 Datace konstrukčních dřevěných prvků hospodářské budovy zámku Rychvald | 77 |
| 6.2 POROVNÁNÍ HYGROSKOPICKÉHO CHOVÁNÍ DŘEVA HISTORICKY STARÉHO SE DŘEVEM REFERENČNÍM | 80 |
| 6.3 MIKROSKOPICKÁ ANALÝZA DŘEVA | 83 |
| 6.3.1 Vzorek A..... | 83 |
| 6.3.2 Vzorek B..... | 88 |
| 6.3.3 Vzorek C | 93 |
| 6.3.4 Vzorek D | 97 |
| 6.3.5 Vzorek E..... | 102 |
| 6.3.6 Vzorek F – referenční recentní dřevo | 106 |
| 6.4 CHEMICKÁ ANALÝZA DŘEVA | 110 |
| 6.4.1 Výsledky množství terpenů při dlouhodobém používání a po termické ochraně dřeva | 110 |
| 6.4.2 Výsledky chemických změn jedlového dřeva během jeho stárnutí..... | 114 |
| 6.5 MECHANICKÉ VLASTNOSTI DŘEVA | 122 |
| 6.5.1 Pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny | 122 |
| 6.5.2 Pevnost v tahu rovnoběžně s vlákny | 128 |
| 6.5.3 Pevnost ve smyku | 131 |
| 6.5.4 Pevnost dřeva ve statickém ohybu | 133 |
| 6.5.5 Výsledky jednofaktorové analýzy rozptylu ANOVA pro jednotlivé pevnosti 136 | |
| 6.5.5.1 Přepočet výsledků na měrnou pevnost | 137 |
| 6.6 VLIV VĚKU NA TEPELNOU DEGRADACI DŘEVA – VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU... 140 | |
| 7 DISKUSE..... | 148 |
| 7.1 DENDROCHRONOLOGICKÉ DATOVÁNÍ..... | 148 |
| 7.2 SORPČNÍ VLASTNOSTI DŘEVA | 148 |
| 7.3 ANALÝZA MIKROSKOPICKÉ STRUKTURY | 149 |
| 7.3.1 Struktura dřeva jedle (<i>Abies alba</i>) | 150 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 7.4 | CHEMICKÁ ANALÝZA..... | 154 |
| 7.4.1 | Uvolňování terpenů při dlouhodobém používání a při termické úpravě..... | 154 |
| 7.4.2 | Chemické změny jedlového dřeva v procesu stárnutí..... | 156 |
| 7.5 | MECHANICKÉ VLASTNOSTI..... | 157 |
| 7.5.1 | Pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny..... | 157 |
| 7.5.2 | Pevnost v tahu rovnoběžně s vlákny..... | 159 |
| 7.5.3 | Pevnost ve smyku..... | 160 |
| 7.5.4 | Pevnost ve statickém ohybu..... | 161 |
| 7.6 | VLIV VĚKU NA TEPELNOU DEGRADACI..... | 162 |
| 7.7 | SYNERGICKÉ ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ JEDNOTLIVÝCH KAPITOL..... | 163 |
| 8 | ZÁVĚR A APLIKACE VÝSLEDKŮ V PRAXI..... | 165 |
| 8.1 | ZÁVĚR..... | 165 |
| 8.1.1 | Dendrochronologie..... | 165 |
| 8.1.2 | Sorpční vlastnosti dřeva..... | 165 |
| 8.1.3 | Mikroskopická analýza..... | 166 |
| 8.1.4 | Chemická analýza..... | 166 |
| 8.1.4.1 | Uvolňování terpenů během stárnutí a termické úpravy dřeva..... | 166 |
| 8.1.4.2 | Chemické změny dřeva v průběhu stárnutí..... | 167 |
| 8.1.5 | Hodnocení pevnosti různě starého dřeva..... | 167 |
| 8.1.6 | Tepelná degradace dřeva..... | 169 |
| 8.2 | APLIKACE VÝSLEDKŮ V PRAXI..... | 169 |
| 8.2.1 | Nedestruktivní metody detekce poškození biologických struktur pomocí CT (computed tomography)..... | 170 |
| 8.2.2 | Nedestruktivní metody detekce poškození biologických struktur pomocí rentgenového záření (RTG)..... | 172 |
| 8.2.3 | Destruktivní metoda štípání dřeva napadeného tesaříkem krovovým..... | 175 |
| 8.2.4 | Významné publikované výsledky řešeného výzkumu..... | 179 |
| 9 | SUMMARY..... | 182 |
| 10 | SEZNAM CITOVANÉ LITERATURY..... | 183 |
| 11 | PŘÍLOHY..... | 193 |
| 11.1 | HODNOTY ROVNOVÁŽNÝCH VLHKOSTÍ DŘEVA PŘI SORPCI A DESORPCI..... | 193 |
| 11.2 | DATA Z CHEMICKÉ ANALÝZY DŘEVA..... | 196 |
| 11.3 | MECHANICKÉ ZATÍŽENÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES..... | 205 |
| 11.4 | STATISTICKÉ ÚPRAVY PRO DATA ANALYZUJÍCÍ VLIV VĚKU NA TEPELNOU DEGRADACI DŘEVA..... | 221 |

1 Úvod

Dřevo jako vnitřní zdřevnatělá část kmene, větví a kořenů podpírá stromy po celá staletí a jako technologický materiál dokáže po dlouhou dobu udržet velká zatížení [1]. Proto je součástí kulturních památek mnoha civilizací již od počátku vývoje lidstva. Unikátní historické památky ze dřeva od soch, oltářů, vyřezávaného nábytku až po celé dřevěné stavby jako kostelíky, zvonice, části hradů a zámků jsou uměleckým vyjádřením představ a estetického citění člověka [2].

Dřevo jako konstrukční materiál je v řadě ohledů porovnatelné s jinými stavebními materiály. Je materiálem pružným, pevným a přitom lehkým, má dobré tepelněizolační vlastnosti, je schopné snášet velká zatížení, tlumit vibrace a má výborné rezonanční vlastnosti [2]. Zároveň je ale materiálem přírodním a jako takový disponuje velkou mnohotvárností danou růstovými podmínkami, prostředím a dědičnými dispozicemi. Tato variabilita vlastností je patrná nejen v rámci druhu, ale i uvnitř jednoho kmene a předurčuje dřevo k anizotropnímu chování. Jako biologický materiál také podléhá v čase degradaci a mění většinu svých vlastností. Přitom při posouzení vlastností dřeva historických objektů a konstrukcí zejména z pohledu rozměrové stálosti jsou pevnostní charakteristiky a hygroskopické chování dřeva zásadní a praktickou otázkou.

Studii zabývajících se problematikou vlastností starého dřeva z hlediska opětovného použití tohoto materiálu ve stavbách je velmi málo a přitom mají velký význam při renovaci kulturních památek. Ty jako nositelé duchovního odkazu minulosti představují v přítomném životě národů živá svědectví jejich sekulárních tradic. Podávají svědectví o svébytné civilizaci, příznačném vývoji nebo historické události. Proto je nezbytně nutné při renovaci historické památky respektovat původní konstrukce a materiály a tím zachovat historickou hodnotu památky, tak jak je uvedeno v Benátské chartě o zachování a rekonstrukci památek a sídel [3].

Z důvodu absence informací o vlastnostech starého dřeva a jejich nutnosti s ohledem na historické památky je práce zaměřena na zjištění řady technických vlastností dřeva s cílem odhalit vzájemnou kompatibilitu těchto vlastností napříč různým stářím získaného materiálu. Základní hypotéza této práce předpokládá, že chemické složení, fyzikální a mechanické vlastnosti zabudovaného dřeva se v čase mění charakte-

ristickým způsobem. Změna chemického složení dřeva v důsledku stáří koresponduje se schopností dřeva odolávat působení vybraných biotických degradačních činitelů, v důsledku předpokládaného úbytku sacharidů vlivem oxidativních procesů v průběhu stárnutí dřeva. Spolu s působením tepla, povětrnostních podmínek a míry ozáření se zvyšuje ve dřevě podíl volných radikálů a toxických látek, které přirozeně chrání dřevo před působením biotických škůdců. Tím se stává dřevo méně atraktivní pro biotické škůdce a oddaluje se tak proces degradace dřeva. Tato hypotéza je umocněna předpokladem, že v důsledku degradačního procesu na chemické úrovni současně kombinovaného s mechanickým zatížením dojde k rozpadu parenchymatických buněk dřevňových paprsků a ke kolapsu ztenčenin buněčných stěn, čímž dojde k uzavření přístupových cest do lumenů buněk a k zásobním látkám vyhledávaným biotickými škůdci.

Problematickou změny vlastností dřeva v čase se disertační práce zabývá primárně z pohledu možnosti plnohodnotného využití druhotně použitého materiálu pro rekonstrukci staveb se zaručením pevnostních požadavků materiálu a odolnosti vůči biotickým a abiotickým činitelům. Sekundárně práce řeší účinnost sanace dřevěných prvků horkým vzduchem a jeho vliv na vnitřní strukturu a vlastnosti dřeva. Hypotézy práce jsou ověřovány na jedli (*Abies alba*) jako často používaném materiálu pro historické stavby.

2 Přehled současného stavu

Dřevo je obnovitelný přírodní zdroj a složitý anizotropní materiál, který se skládá hlavně ze tří biopolymerů: celulosy, hemicelulosy a ligninu, které se společně nacházejí ve stěně dřevních buněk [4]. Kromě těchto polymerických složek může dřevo v menším či větším množství obsahovat extraktivní látky, včetně organických sloučenin, jako jsou sacharidy, flavonoidy, taniny, terpeny, tuky nebo parafín [5, 6]. Dřevo jako biodegradovatelný přírodní materiál je trvale vystaveno degradačním procesům environmentálního, chemického či mikrobiálního charakteru [4]. Existuje celá řada environmentálních (nebiologických) faktorů, jako jsou např. vlhkost, teplota, doba slunečního záření, obsah atmosférického ozónu a znečištění, které významně přispívají k degradaci dřeva [4, 8]. Dle autorů Blanchette *et al.* [7] a Coloma *et al.* [8] jsou tyto environmentální faktory specifické pro každou individuální lokalitu.

Dalším důležitým aspektem, který může významně ovlivňovat stupeň degradace dřeva, je druh příslušného dřeva, tj. měkké nebo tvrdé dřevo [8]. Rozdíly mezi tvrdým a měkkým dřevem jsou dány rozměrem vláken, chemickým složením jednotlivých komponentů a obsahem ligninu a celulózy [8]. Na základě analýzy struktury dřevních složek, chemických a strukturálních změn, ke kterým dochází u dřeva během procesu přirozeného stárnutí, je možné posoudit možnost využití této suroviny k druhotnému použití v památkově chráněných objektech. Společně s analýzami struktury jsou pro využití druhotně použitých dřevěných prvků důležité i technické vlastnosti. Yokoyama *et al.* [1] provedli studii zkoumající mechanické vlastnosti dřeva Hinoki z japonských historických budov, které prošlo procesem stárnutí, Esteban *et al.* [9, 10] se zabývali změnou hygroscopického chování dřeva v procesu stárnutí. Pevnostní a rozměrové vlastnosti jsou z pohledu využití dřeva významné.

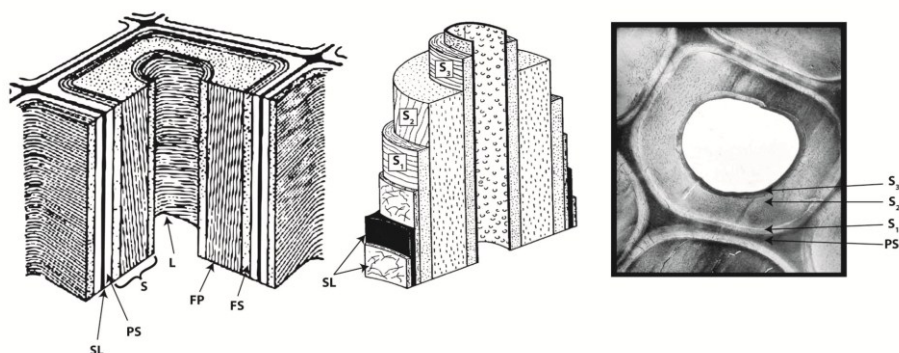
Druhotně použité staré dřevo je však v průběhu svého využívání v historických stavbách navíc vystaveno faktorům, které vyplývají ze způsobu sanace staveb. Tyto způsoby sanací cíleně vedou k likvidaci biologického napadení, a proto přirozená degradace dřeva daná procesem stárnutí může být doplněna o tepelnou degradaci danou způsobem sanace. Vliv obou faktorů degradace na vlastnosti a strukturu dřeva je zkoumán v předkládané práci.

2.1 Změna struktury a chemického složení dřeva v procesu stárnutí

Stárnutí dřeva údajně začíná krátce po jeho porážení [11], tj. ve chvíli, kdy je dřevo vystaveno vnějším vlivům. Stárnutí není pouze následkem plynutí času, ale postupným sledem změn ve dřevě, způsobených jedním či více procesy. Některé z těchto procesů se mohou odehrávat již v živém stromě, a proto je přesnější za začátek stárnutí považovat již období, kdy dřevo vzniká [11]. Sto let starý strom, který je poražen, obsahuje dřevo všech možných stárí až právě do sta let. Některé části dřeva se přeměnily z bělového na jádrové a u starších stromů dokonce mohlo působením hub dojít ke ztrátě jádrového dřeva. Za proces stárnutí je tedy nutno považovat všechny změny, které ve dřevě proběhly do jeho skácení i po něm. Důležitou úlohu hraje taky druh dřeviny a specifické podmínky uložení dřeva [11].

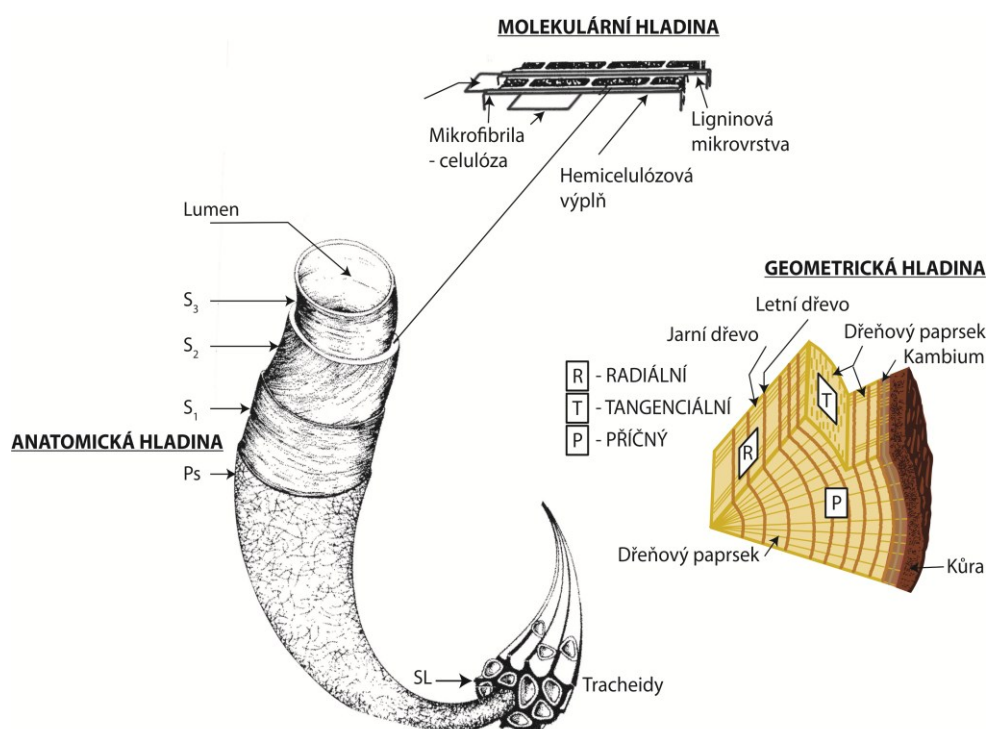
2.1.1 Mikroskopické změny ve stavbě dřeva

Lignifikované buňky dřeva jsou tvořeny buněčnou stěnou a buněčnou dutinou (lumen) [12]. Buněčná stěna dřeva je tvořena ze submikroskopicky i chemicky odlišných vrstev [2], obr. 2.1. Pro tyto vrstvy byla navržena symbolika: SL - střední lamela, P - primární stěna, S_1 , S_2 , S_3 - vrstvy sekundární vrstvy [2, 12]. Termín střední lamela bývá často nahrazen termínem složená střední lamela, která se skládá ze dvou primárních stěn sousedících buněk a střední lamely mezi nimi ($P + SL + P$), obr. 2.1 [2].



Obr. 2.1: Struktura buněčné stěny: SL – střední lamela, P – primární stěna, S_1 , S_2 , S_3 – vrstvy sekundární vrstvy, L – lumen, FP – podélně uložené fibrily celulózy, FS – spirálově uložené fibrily celulózy [12], řez buněčnou stěnou a mikroskopický snímek buněčné struktury s vyznačením jednotlivých vrstev [11]

Střední lamela je ze 70 % tvořena ligninem a z 15 % pentózany [2, 12]. Směrem k buněčné dutině obsah ligninu, v jednotlivých vrstvách buněčné stěny klesá [12]. Celulóza je nejvíce obsažena v sekundární buněčné stěně, a to především ve vrstvě S_2 , obr. 2.2. Požgaj *et al.* [2] uvádí, že v této vrstvě je celulóza zastoupena 70 % v krystalickém podílu a přibližně 30 % v podílu amorfním. Údaje o podílu ligninu ve vrstvě S_2 kolísají podle různých autorů v rozpětí 5 až 20 %. Lignin v sekundární buněčné stěně se chemicky liší od ligninu ve střední lamele. Předpokládá se, že lignin ve střední lamele má vyšší polymerizační stupeň než lignin ve vrstvách buněčné stěny [2]. Poškození dřeva na mikroskopické úrovni je dáno změnami v chemickém složení vznikajícími v průběhu procesu stárnutí dřeva. Dochází k postupnému poškození střední lamely a dalších vrstev buněčné stěny. Výsledkem může být ztráta soudržnosti dřevní tkáně [12].



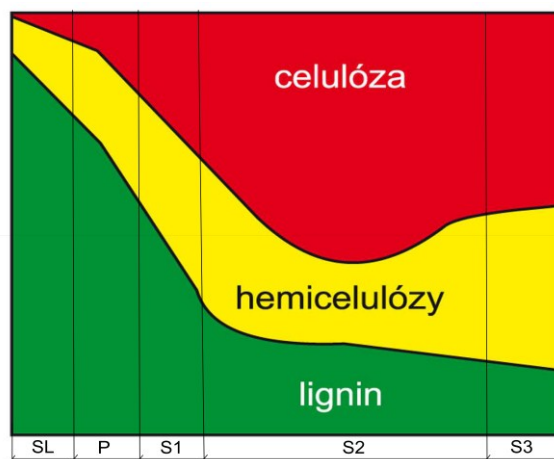
Obr. 2.2: Grafické znázornění strukturálních hladin dřeva [2]

2.1.2 Chemické změny ve stavbě dřeva

Dřevo se z 90 až 98 % skládá z makromolekulárních látek, které formují strukturu buněčných stěn [12]. Dřevo tvoří polymery: celulóza, hemicelulózy a lignin [2, 13]. Celulóza a hemicelulóza tvoří polysacharidický podíl, charakter ligninu je polyfenolický. Průměrné složení dřeva je uvedeno v tab. 2.1 a obr. 2.3.

Tab. 2.1: Průměrné chemické složení dřeva [2,13]

| | | |
|---------------------------------|-------------------------|------------------------------------|
| Hlavní složky dřeva 90-98 % | polysacharidy 70 % | celulóza hemicelulóza |
| | aromatická část 25 % | lignin |
| Vedlejší složky dřeva 2-10 % | organické | polymery nízkomolekulární látky |
| | anorganické | |



Obr. 2.3: Barevné schéma zastoupení hlavních komponentů dřeva [2]

Celulóza je lineární homopolymer, který se skládá z opakujících se jednotek β -D-glukopyranosy vzájemně propojených β -1 \rightarrow 4-glykosidickou vazbou [2, 5, 12]. Délka řetězce celulózy značně kolísá. Průměrný polymerizační stupeň celulózy se pohybuje mezi 8 000 až 10 000. Řetězce celulózy probíhají přes krystalická a amorfní místa, přičemž krystalický podíl má svůj rozhodující význam při reakci s vodou. Pohyblivost molekul v krystalické oblasti je menší než v amorfní, proto je krystalická část celulózy

odolnější vůči vnějším vlivům než amorfni [2, 5]. Hemicelulózy jsou lineární polysacharidy s krátkými postranními řetězci. Jejich průměrný polymerační stupeň je cca 150 [2]. Hemicelulózy jsou méně chemicky odolné a lze je snadno hydrolyzovat [12]. Lignin je amorfni polymer trojrozměrné struktury. Skládá se z jednotek fenypropanu, které jsou různě substituované v bočním řetězci, hlavně hydroxylovými a methoxylovými skupinami.

Proces degradace dřeva dané stárnutím obvykle začíná u hemicelulózy, následuje celulóza, lignin je zpravidla nejodolnější [5]. U celulózy se nejprve odbourává amorfni část, až poté krystalický podíl celulózy [14]. Hemicelulózy stejně jako lignin penetrují celulóзовou kostru buněčných stěn [2]. Jejich nižší stálost je dána nižším polymerizačním stupněm, nižším podílem krystalické části a rozvětvenou strukturou [13]. Solár *a kol.* [15] zjistili, že nejméně odolnou složkou hemicelulóz je xylán. Odbouráváním hemicelulóz v procesu stárnutí dochází ke zvyšování podílu celulózy [11]. Reinprecht [14] ve své práci cituje Nakaou *a kol.*, kteří uvádějí, že krystalický podíl celulózy ve dřevě jehličnanů narůstá prvních 500 let a v dalších letech zůstává přibližně na stejné úrovni. K tomuto tvrzení se přiklání i výsledky práce dalších autorů [14,18]. Fengel [11] uvádí, že při zachování obvyklých teplotních expozic je možné rapidní pokles celulózy pod hranici 1 % zjistit až u dřeva staršího jak 1 až 10 miliónů let [11].

V průběhu stárnutí tedy dojde k zjevnému nárůstu ligninu, ale pokud je složení vyjádřeno na základě zastoupení v celkovém objemu dřeva, mění se obsah ligninu pouze velmi málo [15]. U jehličnatých dřevin jsou stabilní i terpenoidy v pryskyřičných kanálcích [11, 14]. Fengel [11] zvyšování ligninu a ligninových zbytků s rostoucím stářím dřeva potvrzuje. Reinprecht [14] relativní nárůst ligninu v procesu stárnutí nazývá přesněji nárůstem látek, které mají některé vlastnosti analogické s ligninem, např. látky stanovené jako nehydrolyzovatelný zbytek dřeva. Samotné zvyšování ligninu připisuje jednak postupnému odbourávání polysacharidů, jako výše uvedení autoři, a jednak přeměně degradovaných jednotek polysacharidů na látky strukturálně podobné ligninu [14]. Tato skutečnost je pravděpodobně jednou z příčin vyšší odolnosti tracheid jehličnanů. V ligninu probíhají různé oxidační reakce spojené s nárůstem podílu karbonylových (-C=O) skupin a také reakce, při kterých se odbourávají methylové (-O-CH_3) i hydroxylové (-OH) skupiny [14].

Tato skutečnost zřejmě přispívá k rozměrové stálosti dřeva a je příčinou snížení hygroskopie dřeva. Při chemických analýzách starého dřeva se tedy zpravidla projevuje úbytek polysacharidů a nárůst nehydrolyzovatelných zbytků, závislých na stáří resp. stupni degradace. Fengel [11] však uvádí, že ačkoli degradace polysacharidů začíná již v rané fázi, část z nich může přetrvat po mnoho milionů let. Stupeň degradace je tedy výrazně ovlivněn podmínkami prostředí, a to zejména v raných fázích [11].

2.2 Vliv stárnutí dřeva na jeho vlastnosti

2.2.1 Změna mechanických vlastností dřeva v čase

Podle Yokoyamy *et al.* [1] staré dřevo odolává zatížení ve stejné míře jako dřevo historicky mladší a stejného druhu. Ve své práci zatěžovali vzorky dřeva Hinoki tříbovým ohybem v podélném (L) a radiálním (R) směru. Z výsledků nevyplynuly žádné výrazné rozdíly v pevnosti a tuhosti ve směru L a R. Autoři však uvádějí, že stáří dřeva výrazně ovlivnilo jeho postlineární chování, zejména ve směru R, kde s rostoucím časem výrazně klesla energie potřebná k jeho porušení [1]. Autoři na základě výsledků tvrdí, že staré dřevo je pevnostně dostačující a pro stavby bezpečné, ovšem za předpokladu, že není zatěžováno kolmo k vláknům.

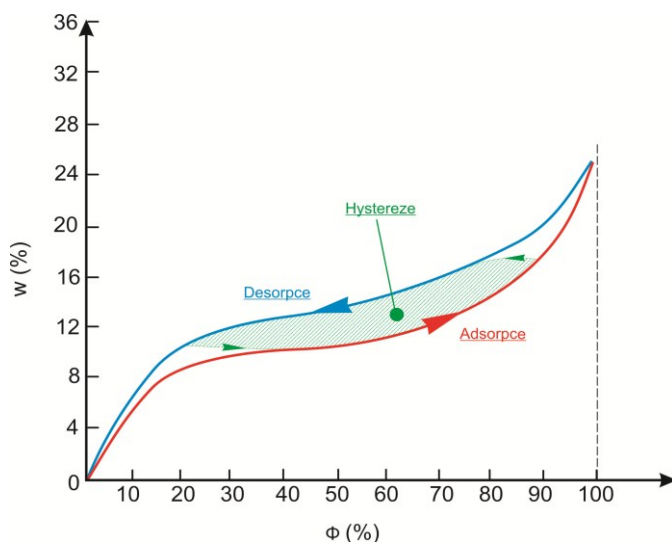
Z praktického využívání dřevěných konstrukcí je známo, že mimo krátkodobých náhodných zatížení jsou také namáhány stálým dlouhodobým zatížením. Za těchto podmínek se dřevo viskózně-pružně přetváří [2]. Na základě výzkumu mnoha autorů je možné konstatovat, že vliv rychlosti zatížení se významně podílí na pevnosti. V technické praxi se ukázalo, že z hlediska pevnosti dřeva není možné zanedbat faktor času. S rostoucím časem zatížení se deformace zvětšuje a dřevo teče [2]. Při dlouhodobém zatížení, se tedy dřevo chová jako viskózně-pružný materiál a od začátku zatížení vzniká plastická deformace. Obecně platí, že při jednotlivých způsobech zatížení bude dřevo tím plastičtější, čím bude mít větší plastickou deformaci bez vzniku makroskopického zlomu [1, 2].

2.2.2 Změny v hygroskopickém chování dřeva v čase

Dřevo je kapilárně porézní materiál, který má schopnost díky adsorpci měnit svoji vlhkost s vlhkostí okolního vzduchu [2]. Adsorpci dřeva rozumíme poutání plynné nebo kapalné látky na měrném vnitřním povrchu dřeva, který je určován z vlhkosti monomolekulární sorpce. Závislost množství adsorbované látky na faktorech prostředí vyjadřují tzv. sorpční izotermy. Jedná se o matematické vyjádření sorpčních teorií, které se snaží vysvětlit adsorpci s ohledem na její fyzikální nebo chemickou podstatu [2].

Za předpokladu, že se vlhkost dřeva ustálí při daných podmínkách prostředí (relativní vzdušné vlhkosti a teplotě), je definována jako rovnovážná vlhkost dřeva (RVD). Stav, který je tímto dosažen, nazýváme stavem vlhkostní rovnováhy (SVR). V případě, že je vlhkost dřeva nižší než SVR, dřevo přijímá (adsorbuje) vodu ve skupenství plynném z okolního ovzduší, v opačném případě vodu ztrácí a nastává proces desorpce [2, 5, 11].

Obrovské množství dynamických hygroskopických rovnovážných stavů, kterými dřevo prochází, znamená, že pokud je udržována konstantní teplota, má výsledná sorpční izoterma esovitý tvar obr. 2.4 [9]. Pokud relativní vlhkost (ϕ) narůstá, nazývá se vzniklá trajektorie sorpční izoterma, pokud naopak klesá, vzniká izoterma desorpční [9, 17, 18].



Obr. 2.4: Sorpční izoterma dřeva, převzato [19]

Tento proces změny vlhkosti dřeva v závislosti na relativní vzdušné vlhkosti a teplotě prostředí je vratný, ale ne po stejné křivce. Pro stejnou φ a teplotu vzduchu je vlhkost dřeva vyšší při desorpci než při adsorpci, proto v místě, kde se křivky nepřekrývají, vznikají při vlhkostních cyklech hysterezní smyčky [20, 21] neboli hystereze sorpce. Podíl sorpčního a desorpčního obsahu vlhkosti pro jeden hypotermický stav se nazývá hysterezní koeficient [22]. Poměr sorpčních isoterem při adsorpci a desorpci pro rozpětí $\varphi = 20-90 \%$ je poměrně konstantní a podle literárních zdrojů kolísá v rozmezí 0,8-0,9. Při $\varphi < 20 \%$ a $\varphi > 90 \%$ se hystereze sorpce blíží k jedné a rozdíl mezi adsorpcí a desorpcí se ztrácí [2].

Vysvětlení vzniku hystereze sorpce je obtížné a dosud zcela neobjasněné. Existuje několik teorií, z nichž žádnou nelze upřednostnit. Nejvýznamnější jsou teorie rozdílného počtu sorpčních míst při desorpci a adsorpci, teorie kónických pórů a teorie hygroelastického efektu [2]. Předpokládá se, že kombinací všech tří uvedených teorií lze vysvětlit vyšší hodnoty sorpční izotermy při desorpci než při adsorpci.

Z existence celulózy a hemicelulózy vyplývá přítomnost skupin OH, H-C-OH a H-C-CH₂OH v buněčné stěně. Tyto skupiny mají polární povahu a voda je polární sloučenina, proto ji tyto skupinky mohou vázat, a dřevo tak získává hygroskopický charakter [9]. Díky přítomnosti zejména hydroxylových OH skupin v buněčných stěnách vegetativních buněk tvořících dřevní tkáň vyrovnává dřevo svoji vlhkost s okolním vzduchem. Esteban *et al.* [9] však uvádí, že tato hygroskopicitá by zůstala pouze povrchovou, vnější nebo obvodovou vzhledem k anatomii buněk, kdyby nebylo přítomnosti ztenčenin v buněčné stěně. Polární charakter molekul vody prostupujících ztenčeninami způsobuje zadržování těchto molekul -OH skupinami v řetězcích celulózy a hemicelulóz [9,10]. Ztenčeniny představují mikroskopická místa buněčných stěn, zajišťují komunikace mezi buňkami a transport látek v anatomických elementech [13]. Zadržování nebo poutání molekul vody OH skupinami není nahodilý a chaotický proces. Fixace vody ve dřevě má tři různé fáze závislé na mechanismu sorpce [9]:

1. monomolekulární sorpce (chemická sorpce, absorpce),
2. polymolekulární sorpce (adsorpce),
3. kapilární kondenzace.

Snížení hygroskopicity dřeva je možné dosáhnout úbytkem hydroxylových skupin [23]. Toho je v procesu stárnutí dosaženo odbouráním hemicelulózy jako nejhygroskopičtější složky dřeva [9, 10], jak je uvedeno v kapitole 2.1.2. Snížení hygroskopicity starého dřeva je také spojeno se stupněm krystalinity, protože schopnost dřeva přijímat vodu sorpcí se snižuje se zvyšujícím se stupněm krystalinity materiálu [24]. Stupni krystalinity a jeho možnému vlivu na hygroskopické chování bylo věnováno několik studií [9, 10, 25]. Estebal *et al.* [9] uvádí, že molekuly vody se v buněčné stěně zachytávají, pokud je vzdálenost mezi nimi menší než 10^{-8} cm.

Jsou-li některé z těchto skupin OH permanentně nasyceny z důvodu blízkosti jiných skupin, dochází ve dřevě také ke ztrátě hygroskopických a rozměrových reakcí. Tato ztráta reakcí může být spíše než stupněm krystalizace celulózy způsobena pokračujícím poklesem koncentrace OH skupin při stárnutí dřeva, protože tento stupeň se sice mění v prvních letech růstu, ale při dalším stárnutí se již významně nemění [9].

2.3 Struktura a vlastnosti termicky upraveného dřeva

Při mnoha technologických procesech je dřevo vystaveno vysokým teplotám, např. při sušení, stabilizaci rozměrů, modifikacích dřeva, rozvlákňování apod. Výše uvedené procesy vyžadují teploty, které obvykle nepřekračují 200 °C, protože není žádoucí tepelná degradace dřeva [5]. Změny ve dřevě nejsou vyvolány pouze teplotou, ale působí zde řada dalších faktorů ovlivňujících proces tepelné degradace, např. doba ošetření, atmosférický tlak, obsah vody, druh dřeva atd. Proto mohou být za určitých podmínek změny ve dřevě pozorovány již od teplot 100 °C [5]. Sterilizace dřeva horkým vzduchem probíhá z důvodu požární bezpečnosti při maximální teplotě 120 °C [26, 27, 28, 29]. Podstata metody spočívá v ohřevu napadených dřevěných konstrukcí horkým vzduchem na teplotu, při které dochází ke koagulaci bílkovin dřevokazného hmyzu a k jeho usmrcení [14]. Uvedená likvidní teplota pro dřevokazný hmyz je stanovena na 55 °C po dobu 60 min. [26, 27, 28, 29]. Při dosažení uvedené teploty dochází k likvidaci hmyzu ve všech jeho stádiích (tzn. vajíčka, larvy, kukly, brouci) [14].

2.3.1 Změny struktury a chemického složení vlivem vysoké teploty

V souvislosti s naší řešenou problematikou je významná otázka, zda při působení těchto nízkých teplot (50-120 °C) použitých při procesu horkovzdušné sanace, dochází ve struktuře dřeva už k určitým chemickým změnám spojeným s jeho depolymerizací, narušením funkčních skupin, úbytkem hmotnosti apod. Reinprecht [30] uvádí, že obecně platí jasná odpověď. Více chemických změn ve struktuře dřeva se může uskutečnit i za nízkých teplot, avšak s nárůstem teploty se podle Arrheniovy rovnice (2.1) výrazně urychlují [31].

$$k = A \cdot e^{-(E_a/RT)} \quad (2.1)$$

kde: k...rychlostní konstanta chemické reakce
A...frekvenční faktor
E_a...Arrheniova aktivační energie (resp. aktivační volná energie)
R...plynová konstanta
T...absolutní teplota (K)

Termické procesy ve stavebních složkách dřeva, tj. chemické reakce i fyzikálně-chemické změny v jeho chemické struktuře, jsou ovlivněny kromě aktivační energie kovalentních vazeb (E_a) a teplotami prostředí (T) i jinými faktory, mezi které je možné zařadit [31]:

- čas expozice,
- skladba prostředí (přítomnost kyslíku, vody atd.),
- druh dřeva,
- rozměry dřeva,
- počáteční vlhkost dřeva.

V zásadě je možné konstatovat, že teplotami nad 100 °C, ale zejména nad 150–170 °C, dochází ke změnám v chemické struktuře, přičemž tyto změny se dále odrážejí v jeho mechanických a fyzikálních vlastnostech [31].

Autoři dále uvádí, že změny v chemické struktuře dřeva při teplotách v oblasti 100 °C se řadí mezi méně významné, spojené s méně intenzivními dehydratačními procesy. Fengel a Wegener [5] uvedené potvrzují na základě chemické analýzy, kdy po tepelném ošetření za různých teplot, dřevo vykazovalo poměrně dobrou stabilitu složek až do teploty 100 °C a doby ošetření 48 hod., [5]. Při vyšších teplotách se stále více snižoval obsah polysacharidů.

Z termických a fyzikálně-chemických analýz použitých na vyhodnocení průběhu termického rozkladu dřeva vyplynuly tyto poznatky [31, 32]:

- **hemicelulózy** – podléhají rozkladu už při teplotách pod 200 °C,
- **celulóza** – podléhá výrazné depolymerizaci při teplotách nad 300 °C,
- **lignin** – se rozkládá za podstatně vyšších teplot nad 300-400 °C, ve spojitosti s intenzivním rozkladem fenylpropanových jednotek i samotných aromatických jader.

Hemicelulózy jsou považovány za nejlabilnější část lignino-sacharidové matrice dřeva po čas jeho termického zatížení [33]. Důvodem jsou amorfni heteropolysacharidy složené z více typů monosacharidů, díky kterým termický rozklad může probíhat v širším rozpětí teplot [31]. Ke zjevnému odbourávání hemicelulóz podle Reinprechta a Vidholdové [31] dochází při teplotách nad 170 °C.

Nad těmito teplotami je možné i očekávat změny v anatomické struktuře dřeva, zejména vznik trhlin ve ztenčeninách buněčných stěn. Zkřehnuté buňky dřeva se tak lépe lámou při mechanickém zatížení [31]. Změnami při zatížení dřeva nižšími teplotami se zabýval Kačík *a kol.* [32], kdy v rozmezí teplot 100-130 °C podali nepřímý důkaz, že při těchto nižších teplotách se celulóza významně nemění. Vyskytly se pouze ojedinělé trhliny na okraji porusu dvojteček u smrkového dřeva (*Picea abies* Karst. L.), [32]. Předkládaná práce by mohla svými výsledky významně přispět k této problematice účinku uvedených nízkých teplot na chemické změny ve struktuře dřeva.

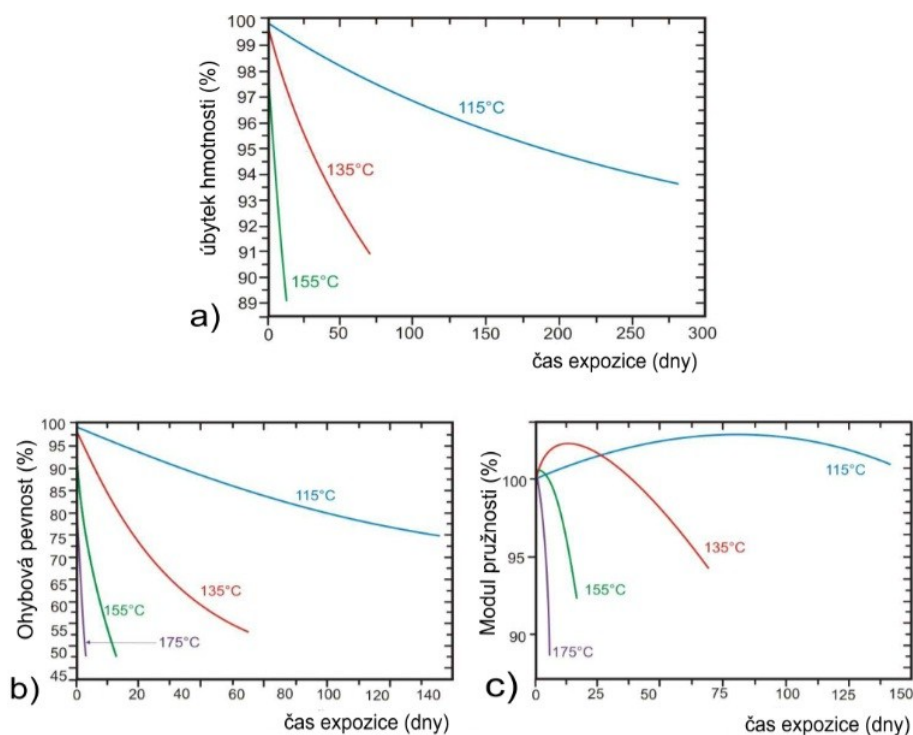
Dřevo je obecně v průběhu svého používání často vystaveno zvýšené teplotě. Sluneční záření ho ohřívá v exteriéru, respektive nepřímo i v interiéru, a to nezdědká i na teploty 50-80 °C [31]. Tyto teploty mohou v přítomnosti srážkové vody nebo jiné vlhkosti vyvolat plastifikaci ligninu, tj. jeho makromolekuly složené z fenylpropanových C₉ jednotek přecházejí ze sklovitého do plastického stavu.

Tyto teploty (do 150 °C) ve většině případů nejsou příčinou výraznějších změn v chemické struktuře dřeva, tím nezpůsobují ani významnější změny jeho vlastností [31]. Jiná situace nastává, když je dřevo vystaveno dlouhodoběji teplotám nad 150-170 °C. Takto vysoké teploty (>150 °C) rozkládají některé stavební polymery dřeva, především hemicelulózy, přičemž se tvoří nové ve vodě nerozpustné látky a také látky s toxickým nebo odpuzujícím účinkem vůči biologickým škůdcům dřeva [31].

2.3.2 Vliv teploty na mechanické vlastnosti dřeva

Změny v mechanických vlastnostech dřeva zatěžovaného vysokou teplotou jsou závislé především na stupni poškození jeho stavebních polymerů [14], velikosti působící teploty a délce působení [34]. Reinprecht [14] uvádí, že ohybová pevnost klesne o 20 % při teplotě 155 °C asi za 3 dny, při teplotě 135 °C asi za 3 týdny a při teplotě 115 °C asi za 15 týdnů, obr. 2.5.

Naopak, modul pružnosti dřeva se vlivem jeho ohřevu při poměrně nižších teplotách v oblasti 100-160 °C nejprve zvyšuje a klesat začíná až po delším čase ohřevu, obr. 2.5 [14]. Vlivem vyšších teplot se modul pružnosti dřeva snižuje téměř ihned, ale podstatně mírněji než pevnost dřeva.



Obr. 2.5: Vliv teploty a času ohřevu dřeva na jeho úbytek hmotnosti (a), pokles ohybové pevnosti (b) a pokles – změnu modulu pružnosti v ohybu (c), převzato [14]

Obecně platí, že pokles pevnosti termicky upraveného dřeva je větší než pokles jeho hmotnosti nebo hustoty [14]. Tahová, tlaková a smyková pevnost dřeva se vlivem vysokých teplot také mění. Tahová pevnost klesá podobně jako pevnost v ohybu [31, 35]. Změny (poklesy) pevností jsou závislé na změnách v chemické struktuře dřeva v úbytku hmotnosti a hustoty a zejména na teplotě, času působení a prostředí – vlhkosti a druhu dřeva [31].

2.3.3 Změny ve fyzikálních vlastnostech dřeva

Hygroskopicitá je velmi významná vlastnost, která ovlivňuje jiné vlastnosti, zejména rozměrovou stabilitu a odolnost vůči biologickým škůdcům. Vlivem působení vysokých teplot se hygroskopicitá dřeva snižuje v porovnání s rostlým dřevem [31, 35, 36]. Reinpercht a Vidholdová [31] uvádí, že výraznější pokles hygroskopicity nastává při použití vyšších teplot a delších časových expozicích. Pokles hygroskopicity je možné podle autora vysvětlit následujícími jevy:

- odbouráním určitého podílu hemicelulóz,
- odbouráním nebo prostorovou blokadí hydrofilních -OH funkčních skupin,
- migrací a redistribucí lipidních a jiných hydrofobních látek [31].

Podíl hydroxylových skupin ve dřevě se při vyšších teplotách snižuje v důsledku kondenzačních reakcí depolymerizovaného ligninu i hemicelulóz. S poklesem -OH skupin je spojen nárůst hydrofóbnosti, kterou odvodili Pogorski *a kol.* (2000) [31] na základě zvětšení kontaktního úhlu vody na povrchu vzorků. Zvýšení hydrofóbnosti povrchu zkoumaných vzorků zdůvodnili mimo pokles funkčních skupin migrací tukových látek k povrchu vlivem vysokých teplot [31]. Snížení obsahu hemicelulóz působením vysokých teplot potvrzuje více autorů [9, 10, 31].

Obataya *a kol.* [37] depolymerizaci hemicelulóz vlivem vysokých teplot přirovnává k přirozené depolymerizaci hemicelulóz, ke které dochází po staletích přirozeného stárnutí. Esteban *et al.* [9, 10] naopak ve své práci uvádějí, že působení vysokých teplot má za následek změnu v hygroskopicitě dřeva, která způsobuje takové fyzikální a chemické změny ve dřevě, které se liší od přirozeného stárnutí. Snížení hygroskopicity dřeva vystaveného vysoké teplotě tedy nelze vysvětlit rekrystalizací celulózy, ale v zásadě chemickými změnami amorfních látek [37]. Sorpčně-desorpční hysterezní křivky teplotně upraveného dřeva jsou podle Renpreichta a Vidholdové [31] plošší, ve shodě s dosažením nižších maximálních hodnot bodu nasycení vláken. Uvedené však platí pro dřevo vystavené teplotám větším než 150 °C, při kterých se hovoří již o termických modifikacích dřeva [31].

Dřevo teplotně upravené má lepší rozměrovou stabilitu, tzn., že při změnách relativní vlhkosti vzduchu se jeho rozměry mění méně než u rostlého dřeva [31]. Potvrzuje to i studie, kterou provedli Edvardsen a Sendland (1999) [31], kdy při sušení teplotou 110 °C vykazovalo dřevo vyšší rozměrovou stabilitu. Podobně jako snížení hygroskopicity, tak i zlepšení rozměrové stálosti dřeva je možné u teplotně zatěžovaného dřeva zdůvodnit častým odbouráním hemicelulóz. Reinprecht [31] uvádí, že není možné vyloučit i jiné vlivy jako například tvorbu esterových a éterových příčných vazeb v ligninu, respektive mezi ligninem a hemicelulózami, díky kterým se struktura buněčných stěn tepelně upraveného dřeva stává odolnější vůči vstupu molekul vody.

Objem dřeva se vystavením vysokým teplotám také zmenšuje, ale méně než příslušný úbytek hmotnosti [31]. Uvedené se odráží na mírném poklesu hustoty tepelně upraveného dřeva. Dřevo vystavené zvýšeným teplotám vykazuje i charakteristické barevné změny a specifické vůně, závislé na velikosti teplot a době působení. Zajímavé barevné změny dřeva vznikají už v procesu hydrotermické úpravy dřeva při použití podstatně nižších teplot v oblasti 100 °C [38]. Dřevo po tepelné expozici získává charakteristickou vůni díky prchavým organickým produktům (VOC – volatile organic compounds) vzniklým rozkladem hemicelulóz [31].

2.3.4 Přirozená trvanlivost dřeva a biologická odolnost

Přirozená trvanlivost dřeva je jeho schopnost zachovat si původní strukturu a technické vlastnosti v různých expozicích, především ve vlhkém prostředí, kde může být napadeno biologickými škůdci [31]. Trvanlivost dřeva se vůči dřevokazným houbám hodnotí podle EN 350-1 a to dle 1. až 5. třídy trvanlivosti.

Experimentální hodnocení trvanlivosti různých druhů dřeva vůči hnilobě vychází z laboratorních zkoušek podle EN 113. Běl je pro všechny dřeva vůči hnilobě netrvanlivá a zařazuje se do 5. třídy trvanlivosti. Trvanlivost vůči dřevokaznému hmyzu se v rámci EN 350-1 hodnotí individuálně, zvláště vůči červotočům (*Anobium punctatum*), tesaříku krovovému (*Hylotrupes bajulus*) a zvláště vůči termitům. V náročnějších expozicích jako například ve stavebnictví musí mít dřevo i dostatečnou pevnost, tvrdost, rozměrovou stabilitu nebo barevnou stálost.

Nedostatečná přirozená trvanlivost méně odolných dřevin jako například smrku, jedle, borovice nebo buku se v praxi zvyšuje různými technologiemi. Přirozenou trvanlivost méně odolných dřevin je možné zvýšit:

- pomocí chemických látek, které mají definovaný směrový účinek (fungicidní látky vůči hnilobě a zbarvení, insekticidní látky vůči dřevokaznému hmyzu, retardéry hoření na snížení hořlavosti apod.),
- modifikováním struktury dřeva, tzn. zásahem hlavně do jeho ligninosacharidové matrice pomocí chemických, enzymatických nebo termických úprav.

Existují studie zabývající se danou problematikou, jejichž výsledky všeobecně uvádějí, že vysoká trvanlivost zejména exotických dřevin vůči biologickým škůdcům je daná hlavně přítomností různých extraktivních látek, přičemž hustota dřeva v tomto případě nemá žádný význam [31].

Podstata zvýšení biologické odolnosti je dána zejména změnami v jejich chemické struktuře. Reinprecht [31] uvádí, že Timar a Mihai (1999) už při poměrně nižší teplotě 130 °C/0,5 h vyvolali mírné zlepšení biologické odolnosti dřeva vůči ligninotvorným dřevokazným houbám. Výsledek však zdůvodňují mechanickým působením při lisování, a tím snížením pórovitosti dřeva a zhoršením přístupu hyf dřevokazných hub do buněčných stěn dřeva. Určité mechanické zatížení se může vyskytovat i při použití dřevěného prvku v krovové konstrukci. V důsledku degradačního procesu na chemické úrovni současně kombinované s mechanickým zatížením lze očekávat rozpad parenchymatických buněk dřevňových paprsků, a tedy i uzavírání nejběžnější cesty napadení dřevokaznými houbami. Těmito převážně mechanickými účinky, tak mohou kolabovat ztenčeniny buněčných stěn, které tímto zneprůstupňují lumen a brání šíření hub volným prostorem dřeva. Tato hypotéza předpokládá, že chemické složení, fyzikální a mechanické vlastnosti zabudovaného dřeva se v čase a působením tepla mění charakteristickým způsobem.

Zlepšení biologické odolnosti narůstá se zvýšením teplot a dobou působení. Všeobecně je odolnost závislá na změnách v chemické struktuře dřeva daná:

- snížením podílu -OH skupin a zvýšením hydrofóbnosti dřeva následkem kondenzačních a jiných reakcí. Tím se snižuje sorpční kapacita dřeva a vlhkost nutná pro existenci biologických škůdců ($w_{\min} = 10 \%$). Rovněž se mění podmínky pro difuzní transporty enzymů produkovaných houbami ve dřevě,
- odbouráním určitého podílu hemicelulóz, které jsou nejpřístupnější pro houby a hmyz,
- vytvořením látek s biocidním účinkem, zejména z původních extraktivních látek dřeva [31].

2.4 Dendrochronologické datování historicky starých prvků

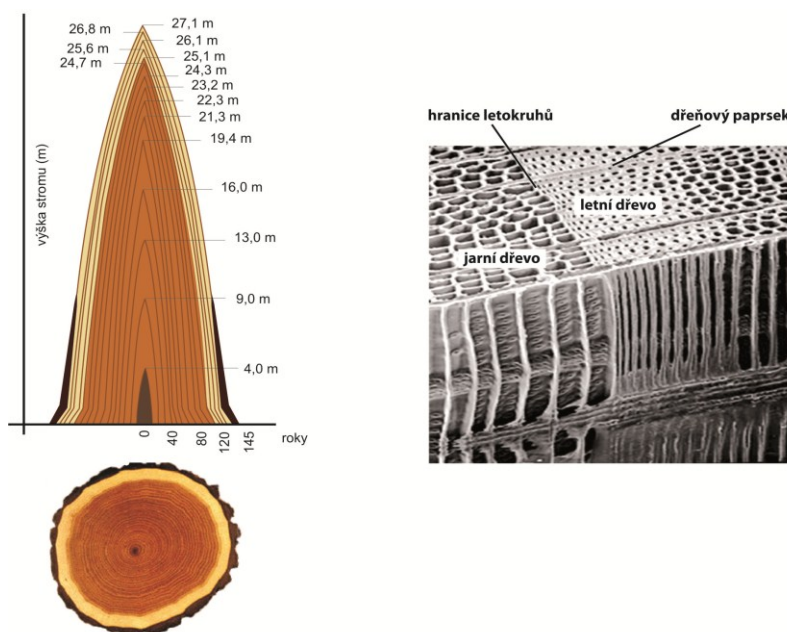
Dendrochronologie je metoda datování dřeva založená na měření šířek letokruhů. Umožňuje datovat dřeva z archeologických výzkumů včetně uhlíků, dřevěné prvky historických staveb, zejména krovů, dále nábytek, dřevěné sochy nebo staré obrazy [39]. Dendrochronologie v širším slova smyslu studuje informace uložené v letokruzích, snaží se oddělit signál (tj. informaci relevantní k řešení daného problému) od šumu a pokouší se vysvětlit příčinu těchto signálů [40]. Pomocí datovacího programu jsou letokruhové křivky vzorků dřeva porovnávány se zvolenou standardní křivkou pro danou dřevinu. Program zobrazí zadaný počet statisticky nejpravděpodobnějších dat měřeného vzorku, tj. pozic, v nichž se křivka vzorku se standardem nejvíce shoduje [39]. Za předpokladu, že má některá ze stanovených pozic na standardu dostatečnou statistickou hodnotu, aby datum připadalo v úvahu, musí se také při optickém srovnání obě křivky setkávat ve většině výrazných minim a maxim (lokální extrémy), souhlasný by měl být i celkový trend křivek.

Pro dataci je nutné odebrat více vzorků z určitého objektu nebo lokality. Samotné prvky dřeva se datují obtížně, protože mohou být výrazně ovlivněny lokálními podmínkami růstu stromu. Při zpracování většího souboru dřev je prvním krokem po jejich změření vzájemné srovnání jednotlivých naměřených křivek. Snahou je najít takovou pozici křivek, kdy tyto spolu výborně korelují, tzn., že jsou současné.

Zprůměrováním křivek vznikne tzv. křivka střední, která zvýrazní společné výkyvy související s klimatickými změnami a potlačí všechny ostatní oscilace způsobené jinými vlivy [39]. Z výše uvedených charakteristik vyplývá, že dendrochronologie je metodou exaktní, neexistuje u ní žádná tolerance.

2.4.1 Stavba letokruhu a faktory ovlivňující tloušťkový růst

Letokruhem se rozumí tloušťkový (radiální) přírůst dřeva vytvořený během vegetačního období příslušného roku periodickou činností dělivého pletiva – kambia [13]. Jedná se o výsledek přerušení tloušťkového růstu stromu v důsledku vegetačního klidu u dřevin v mírném a chladném pásmu [2]. Na příčném řezu dřevem kmene (větví, kořenů) tvoří převážně koncentrické vrstvy. Je složen ze dvou strukturálně odlišných vrstev, a to jarního a letního dřeva [13]. Letokruhy kmene je možné přirovnat k soustavě kuželovitých pláštíků kontinuálně na sebe navazujících (nový letokruh navazuje na předchozí letokruh). Schéma průběhu letokruhů s věkem a po výšce je zobrazen na obr. 2.6.



Obr. 2.6: Radiální řez průběhu letokruhů s věkem a po výšce kmene, upraveno dle [13], mikroskopický snímek zobrazující hranici přechodu mezi jarním a letním dřevem

Stromy každoročně zvětšují své průměry tloušťkovým přírůstem. Růstové projevy jsou výsledkem vzájemné interakce genetické konstituce rostliny a faktorů prostředí [2,13]. Faktory ovlivňující tloušťkový přírůst dřeva lze obecně rozdělit na genetické (vnitřní), biotické a abiotické (vnější), [2, 5, 13]. Jakýkoliv faktor, vnitřní nebo vnější, který se stává pro kambium omezující, limituje i radiální růst rostlin. Mezi nejvýznamnější limitující faktory patří faktory klimatické. Letokruhová řada je tedy nahromaděním vlivu mnoha signálů, z nichž právě klimatický signál je považován za jeden z hlavních řídících faktorů společných pro růst stromů v určité oblasti [39, 40].

2.4.2 Vady dřeva ovlivňující fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva

Mezi významné vady dřeva, které zásadním způsobem ovlivňují jak fyzikální vlastnosti zejména hygroskopické chování dřeva, tak i pevnostní vlastnosti dřeva, je možné řadit reakční a juvenilní dřevo.

Reakční dřevo je makroskopicky viditelné jen u jehličnatých dřevin, tzv. tlakové dřevo [2]. Vzniká jako reakce stromu na mechanické namáhání, v důsledku ohýbání kmene silnými větry, sněhem, lavinami, hmotnostní koruny apod., [13]. Jeho výskyt výrazně zvyšuje heterogenost stavby dřeva. Mikroskopická, submikroskopická, ale i chemická struktura tlakového dřeva je odlišná od normálního dřeva. Díky skutečnosti, že reakční tlakové dřevo má okrouhlé tlustostěnné tracheidy, tak dřevo vykazuje vyšší hustotu [13]. V důsledku vyššího podílu ligninu má tlakové dřevo vyšší ohybovou pevnost. Vykazuje vyšší odklon celulóзовých mikrofibril ve vrstvě sekundární buněčné stěny S_2 vzhledem k podélné ose kmene, což je důvod vyšší náchylnosti k borcení [13].

Juvenilní dřevo tzv. mladé, není považováno jednoznačně za vadu dřeva, nicméně vzhledem ke své odlišné struktuře význačně ovlivňuje jeho vlastnosti. Juvenilní dřevo se tvoří v prvních 15-20 letokruzích v okolí dřeně a je součástí každého kmene [2]. Vliv přítomnosti juvenilního dřeva je u jehličnatých dřevin citelnější než u listnatých. Juvenilní dřevo má oproti staršímu nižší hodnoty příčných a podélných rozměrů vláken, což ovlivňuje řadu pevnostních charakteristik. Má nižší podíl celulózy a vyšší podíl ligninu [2]. V buněčné stěně ve vrstvě S_2 , má mikrofibrily uloženy pod větším úhlem vzhledem k podélné ose kmene. Uvedené zvětšení se výrazně projevuje při podélném sesychání juvenilního dřeva [13].

3 Cíl práce

Cílem disertační práce je porovnání dosažených hodnot vybraných vlastností dřeva historicky staršího data s hodnotami dřeva referenčního (čerstvě pokáceného) za účelem potvrzení nebo vyloučení možnosti využití druhotně použitého dřeva pro účely sanace památkově chráněných objektů.

Předmětem experimentální části práce je zjištění stáří historického materiálu (řádově ve staletích) z oblasti Beskyd získaného z konstrukcí vybraných historických objektů. Na normovaných vzorcích z původních materiálů byly zjištěny vybrané fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a provedena analýza jejich struktury a chemického složení. Výsledky experimentální části práce budou porovnávány s výsledky zkoušek provedených na normovaných vzorcích referenčního dřeva. Za předpokladu porovnatelných vlastností dřeva historicky staršího oproti dřevu referenčnímu je možné jeho plnohodnotné využití ve stavbách s použitím nových sanačních metod.

Způsoby sanací dřevěných konstrukcí objektů památkově chráněných by měly zohlednit požadavky Benátské charty na zachování původních tradičních technik a materiálů substance při provádění oprav. Z uvedeného důvodu je volba sanačních metod pro tyto objekty velmi významná. Práce se z části zabývá problematikou jedné z metod sanace dřevěných konstrukcí, metodou horkovzdušné sterilizace dřeva. Získané výsledky z experimentální části jsou z uvedeného důvodu porovnány s výsledky analýz a vlastností dřeva tepelně zatíženého.

Disertační práce řeší tyto dílčí cíle:

Určení stáří vzorků z historických stavebních konstrukcí metodou dendrochronologického datování s použitím standardní letokruhové chronologie pro Českou republiku.

1. Zjištění vlastností dřeva starého a referenčního:

- a) Provedení mikroskopické analýzy historicky starého dřeva a porovnání se strukturou dřeva referenčního z pohledu diferencí vzniklých v procesu stárnutí.

- b) Provedení chemické analýzy pro ověření množství zejména hlavních a extraktivních složek dřeva a jejich kvantitativní zhodnocení v závislosti na stáří dřeva.
- c) Experimentální zjištění sorpčních a vybraných mechanických vlastností dřeva starého a porovnání získaných výsledků s hodnotami referenčního dřeva.

2. Zjištění vlastností tepelně zatíženého dřeva starého a referenčního:

- a) Provedení chemické analýzy na vzorcích starého a referenčního dřeva zatíženého teplem po stanovenou dobu a porovnání výsledků s hodnotami dřeva nezatíženého.
- b) Z pohledu požární bezpečnosti zjistit, posoudit a porovnat reakci starého a referenčního dřeva na podmínky simulující podmínky požáru.

Přínos práce je možno shrnout do následujících bodů:

- Na základě analýz bylo provedeno porovnání možné míry napadení historicky staršího dřeva a dřeva referenčního dřevokazným hmyzem pomocí nedestruktivních metod CT (*computed tomography*) a RTG zářením, které byly porovnány s metodou destruktivní. Monitorování stavu historických krovových konstrukcí je významnou otázkou pro praxi. Destruktivní metody jsou u těchto objektů zcela vyloučeny a mnohé nedestruktivní metody nejsou schopny odhalit přesný rozsah poškození dané konstrukce. Uvedené výsledky vedou k možnému řešení dané problematiky.
- Ověření účinnosti likvidity dřevokazného hmyzu, hub a plísní pomocí horkovzdušné sanační metody určené pro dřevěné stavby. Likvidita je zaručena poklesem obsahu sacharidů a metoxylových skupin ligninu v závislosti na stáří materiálu.

4 Materiál zkušebních vzorků

Pro experimentální analýzy zabývající se porovnáním vlastností dřeva historicky staršího oproti dřevu referenčnímu (nativnímu, nedávno pokácenému, nijak neupravenému) bylo vybráno dřevo jedle (*Abies alba*), jako často používaný materiál na stavbu krovů nejen historických objektů. Odebraný materiál pocházel ze zabudovaných prvků (zpravidla krovů) staveb lišících se stářím, významem stavby a konstrukcí.

Aby bylo možné zkoumat změny vlastností dřeva, které prošlo procesem stárnutí, bylo nutné vybrat referenční vzorek pro vzájemné srovnání. Je obtížné a někdy zcela nemožné získat takové „nové“ (referenční) dřevo, které by alespoň částečně odpovídalo danému vzorku starého dřeva z pohledu genetické variability dané podmínkami růstu jednotlivých stromů. Pro experimentální porovnání byl vybrán nezabudovaný trám (vzorek F) rovněž ze dřeva jedle (*Abies alba*) získaný pořezem (prizmováním) na pile v Ostravici.

Prvky staveb byly odebrány v délkách přibližně 1 m s lokálním poškozením především od dřevokazného hmyzu (tab. 4.1). Pro dendrochronologické datování bylo u odebíraných prvků důležité zachovat běl z důvodu přesného datování (rok skácení) a to i v případě, kdy byla napadena dřevokazným hmyzem. Pro následné porovnání výsledků bylo vybráno pro jednotlivé analýzy, fyzikální a mechanické vlastnosti již dřevo bez vad (suky, trhliny) a pokud možno bez biologického napadení, které bylo kontrolováno vizuálně, čímž nebylo možné ve všech případech zaručit kvalitu vzorků bez účinku působení dřevokazného hmyzu. Výběr materiálu byl proveden tak, aby naměřené vlastnosti nejvíce odrážely pouze skutečné stárnutí materiálu (při dodržení normativních požadavků na jednotlivé experimentální zkoušky), které jsou výsledkem dlouhodobého působení mírného mechanického napětí v závislosti na funkci prvku ve stavbě a působení změn teploty a vlhkosti prostředí. Toho bylo dosaženo odstraněním povrchové vrstvy, tak aby následné odebírání normovaných vzorků pro měření převážně fyzikálních a mechanických vlastností bylo ze středové části, tedy především z jádrového dřeva. Tímto postupem byla vyloučena přítomnost bělového dřeva a částečně případná degradace dřevokazným hmyzem i abiotickými činiteli. Zkušební tělesa pro fyzikální a mechanické zkoušky byla vybírána dle ČSN 49 0123 a ČSN 49 0101.

4.1 Charakteristika odebraného materiálu

V českých zemích roste jedle bělokorá (*Abies alba*) ve všech okrajových i vnitrozemských pohořích. Z podhorských a horských poloh v Čechách místy sestupuje až do oblasti pahorkatin [41]. Na Moravě se vyskytuje v Moravském krasu a roste ve Chřibech. Na území Moravy její spodní hranice rozšíření leží v rozmezí 400-500 m n. m. V Karpatech je rozšířena počínaje Bílými Karpaty přes Beskydy do centrální oblasti masivu [41].

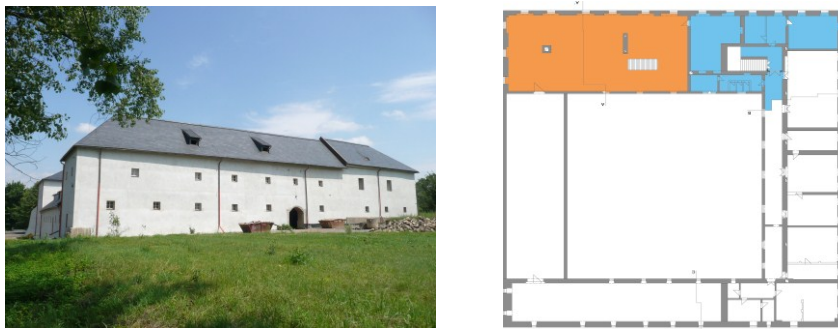
Jedlové dřevo z makroskopického hlediska nemá rozlišeno jádro a běl, pouze u čerstvě skáceného dříví může být patrna běl a světlejší vyzrálé dřevo [13]. Barva dřeva je šedobílá až hnědošedá, letokruhy jsou dobře znatelné se středně ostrým přechodem od jarního k letnímu dřevu v rámci letokruhu. Patří mezi jehličnaté dřeviny, které nemají pryskyřičné kanálky. Dřevo jedle je bez lesku a svou hustotou se řadí do kategorie dřevin s nízkou hustotou, s hodnotami u absolutně suchého dřeva $\rho_0 = 405 \text{ kg/m}^3$ a při 12% vlhkosti $\rho_{12} = 435 \text{ kg/m}^3$. Jedlové dřevo je využíváno převážně jako dřevo stavební. Díky své lepší trvanlivosti ve vodě se upřednostňuje ve vodních a podzemních stavbách (piloty atd.). Používá se na výrobu střešní krytiny (šindele) a zejména na konstrukční prvky střech. Díky nestejně tvrdosti jarního a letního dřeva je snadno štípatelné, odlupčivé, dobře se suší, hůře impregnuje. Celkově je méně odolné vůči abiotickým činitelům (teplota, vlhkost, UV záření apod.) a středně odolné proti biotickým škůdcům [41].

4.1.1 Historie a popis míst odběru materiálu

4.1.1.1 Popis zámku Rychvald

Původně renesanční patrový zámek z 16. století, zvaný také jako Starý Dvůr, tvoří uzavřený čtyřkřídlý objekt. Hlavní patrové zámecké budovy tvoří půdorys písmene "U" a čtvrtá strana je uzavřena přízemními stájemi. Zámek má nádvoří arkádovou chodbu v přízemí a vstupní renesanční portál se dvěma polosloupky podpírajícími kamennou římsu. V některých místnostech v přízemí hlavního východního křídla se dochovaly renesanční valené klenby s ozdobnými žebry či výsečemi.

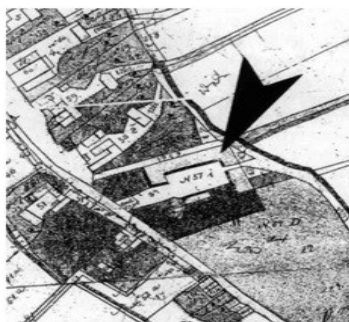
V severovýchodním nároží se v přízemí zámku zachovala drobná domácí kaple. Zámeckým pánům sloužila východní část severního křídla a celé křídlo východní. Zbylé části zámku sloužily hospodářským a správním účelům [42].



Obr. 4.1: Celkový pohled na zámek Rychvald s vyznačením zámku a dvora na půdoryse, kde oranžová barva značí odběr vzorků skupiny E z hospodářské budovy a modře je značen odběr vzorků skupiny A z hlavní budovy zámku [42]

4.1.1.2 Popis sídla pánů z Bernartic

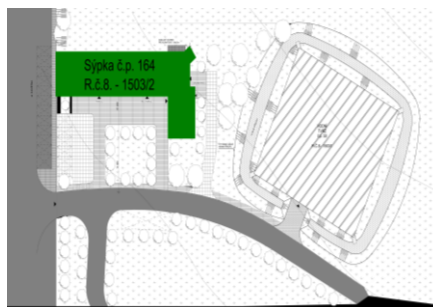
Bývalý středověký svobodný dvůr (tvrz), bývalé sídlo pánů z Bernartic, se nachází na popisném čísle 57 a byl založen na obdélném půdoryse. Obvod dvora (tvrze) patrně tvořila masivní kamenná zeď, k níž se z vnitřní strany přimykaly kamenné, obytné a dřevěné provozní objekty. Původní kamenná zeď se doposud takřka v celé své délce zachovala na severní straně dvora. Původní nádvorní kamenná zeď se také zachovala v západní části severního objektu. V současnosti je jižní polovina někdejšího středověkého dvora rozparcelována a prochází jí přístupová komunikace za dvůr. Východní část dvora tvoří samostatný dům moderně přestavovaný na penzion. Zbylou polovinu severní fronty tvoří kamenná hospodářská budova, ve které jsou stáje a dílny. Západní křídlo tvoří nově opravená obytná budova obrácená k přístupové straně [43].



Obr. 4.2: Pohled na sídlo pánů z Bernartic s vyznačením objektu někdejšího středověkého svobodného dvora na indikační skice katastru z 30. let 19. století [43]













4.1.1.3 Popis sýpky u tvrze ve Velké Polomi

První zmínka o poplužním dvoře ve Velké Polomi se dochovala z 2. poloviny 14. a 1. poloviny 15. století. Ten byl vždy součástí sousední zděné tvrze a sloužil jí jako její hospodářské a provozní zázemí. Z poplužního dvora, který byl demolován na přelomu let 2005 – 2006, se kromě torza tvrze zachoval pouze památkově chráněný objekt tzv. „sýpky“ na p.č. 598. Jedná se o renesanční dvojkrídlový objekt v těsném sousedství tvrze. Patrový objekt je v inventáři zmiňován již k roku 1682, ale lze usuzovat, že se jedná o objekt starší. V minulosti sloužil jako nejstarší pivovar (náznaky jeho technologií se podařilo během rekonstrukce archeologicky odhalit), sýpka a tzv. panský dům. Objekt je částečně zapuštěn do svahu, proto se velký klenutý renesanční sál v přízemí jeví z čelní strany jako suterén [44].



Obr. 4.3: Pohled na průčelí sýpky ve Velké Polomi a situační výkres s vyznačením objektu sýpky a odběru vzorků skupiny C [44]

Tab. 4.1: Původ, rozměry a geometrie odebraného materiálu

| VZOREK | MATERIÁL - (<i>Abies alba</i>) | | PŘÍČNÝ ŘEZ | PRŮŘEZ A POČET KU- SŮ |
|----------|---|---|--|-----------------------------|
| A | stropní trámy hlavní budo- vy zámku Rychvald, dato- váno (1622/23) |  |  | 100 × 90 mm 3 ks |
| B | krokve a obvodové zdi domu v Palkovicích čp. 691, datováno (1775/1776) |  |  | 260 × 160 mm 2 ks |
| C | trámy stropů a krovů do- stupných částí sýpky ve Velké Polomi , datováno (1801/1802) |  |  | 235 × 175 mm 4 ks |
| D | prvky středověkého svo- bodného dvora v Bernarticích čp. 57, trámy krovu stájí datovány (1810/1811) a prvky penzi- onu datovány (1841+ a 1852+) |  |  | 250 × 175 mm 8 ks |
| E | stropní trámy hospodářské budovy zámku Rychvald, datováno (po roce 1852+ a 1853+) |  |  | 225 × 200 mm 3 ks |
| F | referenční prvek – jedlový nezabudovaný trám (21. stol.) |  |  | 150 × 110 mm 3 ks |

4.2 Odběr materiálu pro dendrochronologické datování

Vzorky pro datování (A-E) z funkčních prvků uvedených objektů byly odebírány jako příčné řezy nebo jako vývrty, obr. 4.4. Příčný řez byl veden kolmo na směr růstu tak, aby byl získán příčný průřez s největším počtem letokruhů od jádra po okraj kmene. Za optimální je považován vzorek, který obsahuje podkorní letokruh i dřeň. Podkorní letokruh je poslední vytvořený letokruh, který datuje rok smýcení stromu [39]. Příčný řez (řez čelní) prvkem umožňuje znázornění důležitých diagnostických znaků, především letokruhů, které zde vytvářejí víceméně koncentrické přírůstové vrstvy. Na řezu je možné vyhodnotit šířku letokruhu, procentuální zastoupení jarního a letního dřeva, ostrost přechodu mezi jarním a letním dřevem, výraznost hranice letokruhu.

Mimo letokruhy jsou na tomto řezu patrné i vady dřeva, jako excentricita, reakční dřevo apod. Vývrty byly odebírány pomocí Presslerova přírůstového nebozezu (obr. 4.4) tak, aby prořál co nejvíce letokruhů [39]. Presslerův nebozez je ocelový, dutý a samořezný o vnějším průměru 10 mm a o průměru dutiny (tj. průměru odebraného vzorku) 5 mm [45]. Pokud byl patrný podkorní letokruh, byl vzorek odebírán v jeho místě, v případě, kdy nebyl zřetelný, byl odebírán větší počet vzorků z jednoho prvku pro vytvoření reprezentativního souboru. Z toho poté byl vybrán ten, který obsahoval největší počet letokruhů.



Obr. 4.4: Odběr vývrty Presslerovým nebozezem a detail odebraného vývrty [39]

4.3 Příprava vzorků pro zjištění sorpčních vlastností dřeva

Pro experimentální porovnání hygroskopického chování dřeva starého, referenčního a tepelně zatíženého byly použity vzorky skupiny A a F, tab. 4.1. Vzorky referenčního dřeva historicky řazené do 21. stol. byly odebrány z nezabudovaného trámu a vzorky zastupující staré dřevo pocházely ze stropních trámů hlavní budovy zámku Rychvald datovaných do 17. stol. Z vybraných prvků byla zhotovena zkušební tělesa ve tvaru pravoúhlého hranolu o rozměrech $20 \times 20 \times 30$ mm a $20 \times 20 \times 60$ mm, kde poslední rozměr je měřený ve směru vláken. Pro stanovení sorpčních charakteristik (rovnovážné vlhkosti dřeva - RVD) bylo nutné, aby vzorky - zejména starého dřeva - nebyly napadeny dřevokazným hmyzem nebo houbami. Biotické napadení by vedlo ke změně obsahu hemicelulóz a tím ke snižování hygroskopicity. Tím by bylo znemožněno vzájemné srovnání. Vzorky dřeva byly odebírány především ze středové části trámů. Rozsah výběrového souboru pro každou skupinu je uveden v tab. 4.2.

Tab. 4.2: Rozměry zkušebních vzorků, počet pro všechny relativní vlhkosti vzduchu a rozdělení do skupin podle datace

| Datace | Skupina - vzorek | Rozměry a počet těles [ks] | |
|------------------|----------------------|----------------------------|----------------------|
| | | 20 x 20 x 30 [mm] | 20 x 20 x 60 [mm] |
| 17.stol. 1622/23 | A - staré dřevo | 47 | 40 |
| 21.stol. 2011 | F - referenční dřevo | 27 | 10 |

4.4 Příprava vzorků pro mikroskopickou analýzu dřeva

Materiál pro mikroskopickou analýzu dřeva byl vymanipulovaný ze stavebních prvků dřevěných konstrukcí historických staveb. Věk zabudovaného dřeva se pohyboval v rozpětí od roku 1622 až do současnosti (referenční dřevo), což představuje téměř 400 roků pro nejstarší dřevo zabudované v historické stavbě. Věk jednotlivých vzorků udává tabulka 4.1.

Vzorky ve formě přířezů vysokých cca 100 mm (podélný směr dřeva) měly příčné rozměry odpovídající příčným rozměrům dřevěného prvku historické stavby. Nejstarší dřevo (vzorek A), zabudované do historické stavby na začátku 17. století, mělo tvar zredukovaného hranolu ze tří stran čerstvě omítnutého pilou.

4.4.1 Makroskopický popis vzorků

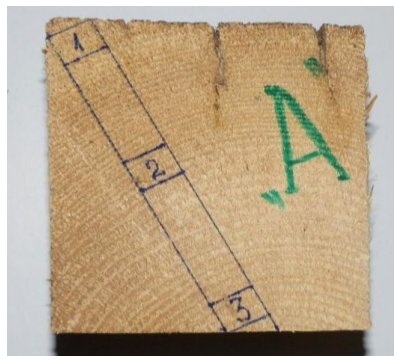
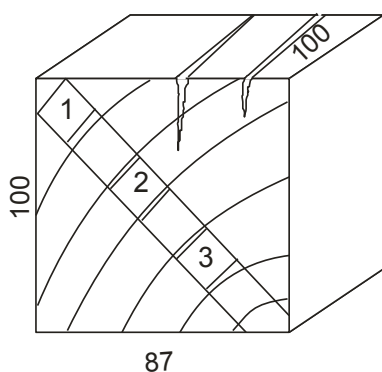
Abychom získali komplexní informace o dřevě zabudovaném v historických stavbách, byly vzorky dřeva makroskopicky popsány. Hodnocený byl vzhled dřeva (textura dřeva zahrnující barvu a barevné změny) a vizuální degradace dřeva houbami a dřevokazným hmyzem. Zvlášť byla měřena šířka ročních přírůstků za jednotlivá desetiletí, na základě čehož byla vypočítána průměrná šířka ročního přírůstku. Věk dřeva byl stanovený jako počet ročních letokruhů od jádra (dřeně) po obvod vzorků. V případě, kdy vzorky neobsahovaly dřeň, byl počet ročních letokruhů vypočítán na základě odhadu šířky průměrných ročních letokruhů v blízkosti dřeně (průsečík dvou poloměrů). Podobně byl odhadnutý podíl letního dřeva v ročním přírůstku, z čehož bylo možné odvozovat stresové období stromu, ze kterého byl dřevěný stavební prvek vymanipulován.

Vzorek A

Vzorek dřeva byl datován do období 1622-1623 a měl rozměry 100 x 87 x 100 mm (r x t x l směry). Podle barvy a kvality tří různých ploch byl pravděpodobně vymanipulován z většího vzorku dřeva. Pouze jedna řezaná plocha vykazovala známky dlouhodobé expozice. Na této ploše se vyskytovaly trhliny zasahující do hloubky 1/4 až 1/3 vzorku. Barva dřeva byla krémově-šedá až nahnědlá. Vizuálně vzorek nevykazoval znaky poškození dřevokaznými houbami. Od dřeně po obvod měly vzorky přibližně 60 ročních přírůstků. Podíl letního dřeva byl odhadnut na 20–30 %. Prakticky polovina vzorků vykazovala znaky juvenilního dřeva.

Tab. 4.3: Průměrná šířka ročních přírůstků za jednotlivá období na vzorku A

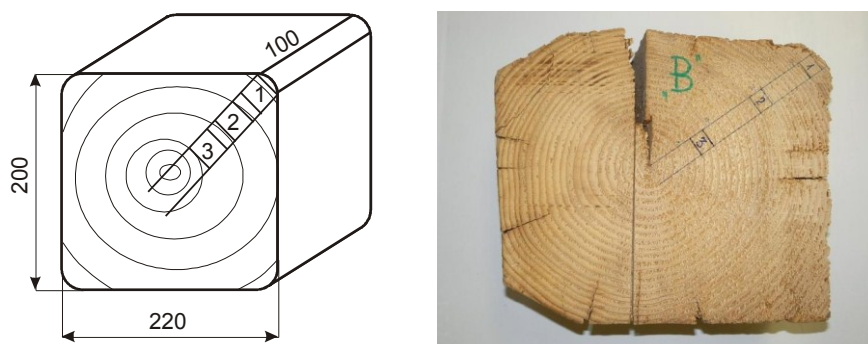
| Rok | 0–10 | 11–20 | 21–30 | 31–40 | 41–50 | 51–60 |
|-----------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| mm | 27 | 28 | 24 | 15 | 17 | 19 |
| \bar{x} | 2,7 | 2,8 | 2,4 | 1,5 | 1,7 | 1,9 |



Obr. 4.5: Schéma a pohled na vzorek A

Vzorek B

Věk vzorku byl datován do období 1775-1776. Vzorek byl vyřezaný z celého dřevěného konstrukčního prvku. Podélné plochy vzorku vykazovaly znaky dlouhodobé expozice, ale beze stop biologické degradace. Podélné trhliny zasahovaly do hloubky 20–30 mm, jedna velká trhlina probíhala až do středu prvku (dřeně). Podstatná část vzorku byla tvořena juvenilním dřevem se šířkou ročních letokruhů 4–5 mm. Barva dřeva na příčném řezu byla hnědošedá bez barevných změn odpovídajících přítomnosti dřevokazných hub. Dřevo bylo bez požíreků dřevokazného hmyzu. Od dřeně po povrch vzorku se nacházelo cca 40 ročních přírůstků. Podíl letního dřeva byl přibližně 30–50 %, což je typickým znakem jedlového dřeva.



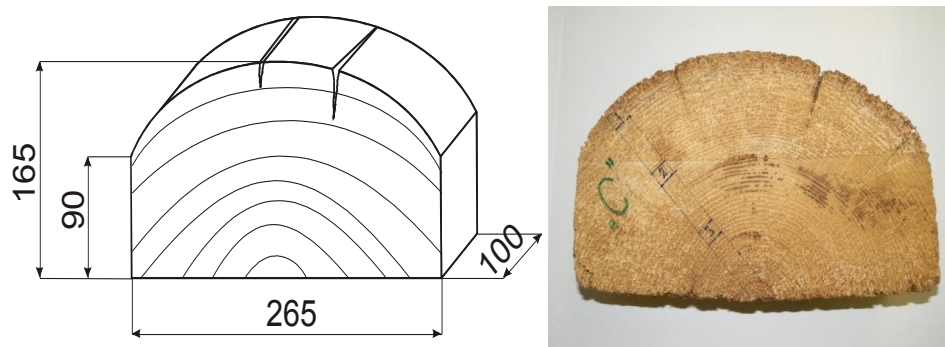
Obr. 4.6: Grafické schéma a pohled na vzorek B

Tab. 4.4: Průměrná šířka ročních přírůstků za jednotlivá období na vzorku B

| Rok | 0–10 | 11–20 | 21–30 | 31–40 |
|-----------|------|-------|-------|-------|
| mm | 50 | 40 | 33 | 20 |
| \bar{x} | 5,0 | 4,0 | 3,3 | 2,0 |

Vzorek C

Věk vzorku byl datován do období 1801-1802. Vzorek byl řezán z celého průřezu konstrukčního dřevěného prvku. Byl vyřezán z poloviny kmene s ložnou plochou vedenou přesně přes dřev. Jedna strana původního konstrukčního prvku byla tvořená oblinou. Rozměry vzorku byly 265 x 165 x 100 mm. Trhliny nacházející se na oblině pronikaly do hloubky 10–50 mm. Barva dřeva byla hnědá s tmavohnědými zónami odpovídajícími pokročilému stavu degradace dřeva dřevokaznými houbami. Oblina vzorku byla silně poškozena pozerky dřevokazného hmyzu o průměru 1 mm, zasahujícími do hloubky prvku 30–40 mm. Pozerky na spodní ploše vzorku se vyskytovaly jen ojediněle. Věk čela vzorku byl stanoven na 64 let. Podíl letního dřeva byl 20–30 %.



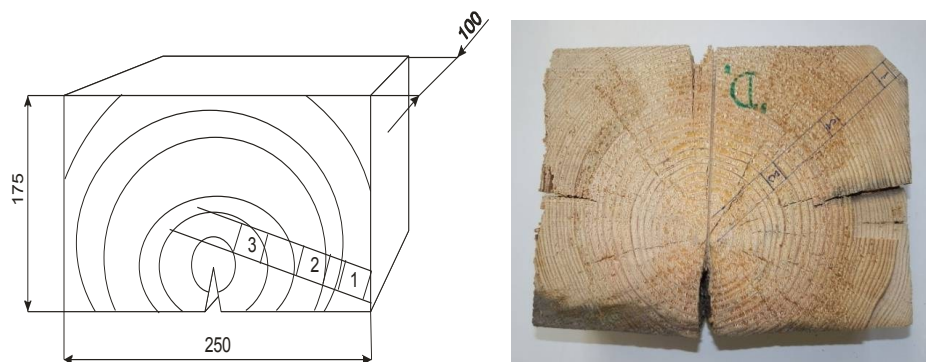
Obr. 4.7: Grafické schéma a pohled na vzorek C

Tab. 4.5: Průměrná šířka ročních přírůstků za jednotlivá období na vzorku C

| Rok | 0–10 | 11–20 | 21–30 | 31–40 | 41–50 | 51–60 | 61–64 |
|-----------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| mm | 30 | 25 | 28 | 20 | 23 | 28 | 10 |
| \bar{x} | 3,0 | 2,5 | 2,8 | 2,0 | 2,3 | 2,8 | 2,5 |

Vzorek D

Věk vzorku byl datován do období 1841+. Vzorek byl vyřezán z hraněného konstrukčního prvku s dřením lokalizovanou v blízkosti středu čela. Na každé ploše se vyskytovala trhlina, přičemž jedna velká průběžná zasahovala do dřeně prvku. Ostatní trhliny pronikaly do hloubky 30–50 mm. Podélné plochy konstrukčního prvku byly se znaky dlouhodobé expozice. Juvenilní dřevo vzorek obsahoval do 20 ročních letokruhů s průměrnou šířkou 4–5 mm. Obvodové přírůstky ročních letokruhů byly široké 1,5–2 mm. Věk vzorku byl spočítán na 53 roků. Barva dřeva byla krémově-šedá a na některých místech přecházela do hnědé, což identifikovalo přítomnost dřevokazných hub. Už při řezání bloků pro elektronovou mikroskopii byla cítit výrazná pryskyřičná vůně dřeva. I samotná hmotnost vzorku nasvědčovala vyšší hustotě dřeva než u ostatních vzorků, což detekovalo přítomnost houby o vyšší vlhkosti. Podíl letního dřeva byl cca 20–50 %.



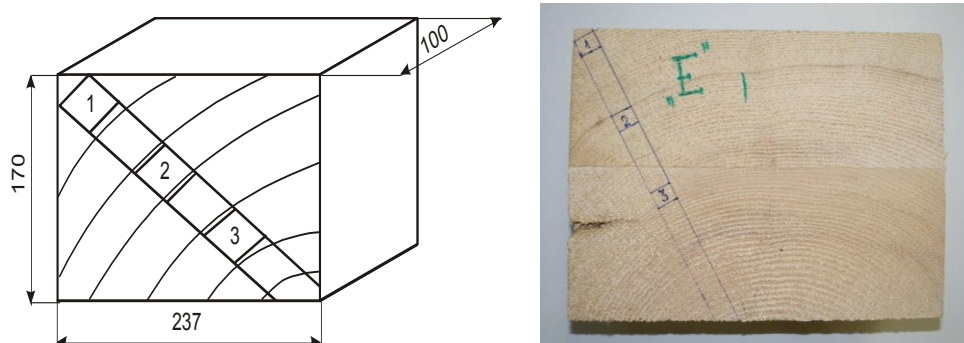
Obr. 4.8: Grafické schéma a pohled na vzorek D

Tab. 4.6: Průměrná šířka ročních přírůstků za jednotlivá období na vzorku D

| Rok | 0–10 | 11–20 | 21–30 | 31–40 | 41–50 | 51–53 |
|-----------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| mm | 50 | 43 | 34 | 23 | 12 | 3 |
| \bar{x} | 5,0 | 4,3 | 3,4 | 2,3 | 1,2 | 1 |

Vzorek E

Věk vzorku byl datován do období 1852+. Vzorek byl vyřezán z hraněného hranolu o rozměrech 170 x 237 x 100 mm a měl tři podélné opracované plochy. Jedna plocha vykazovala znaky dlouhodobé expozice (šedohnědá barva). Barva dřeva byla krémově-šedá bez jakýchkoli znaků poškození nebo zbarvení houbami. Vzorek byl prakticky bez trhlin. Původní konstrukční prvek (hranol) byl vyrobený z poloviny kmene, což odpovídalo věku stromu přibližně 105 roků. Vzorek neobsahoval výraznou zónu juvenilního dřeva. Podíl letního dřeva byl stanoven v rozmezí 15–20 %.



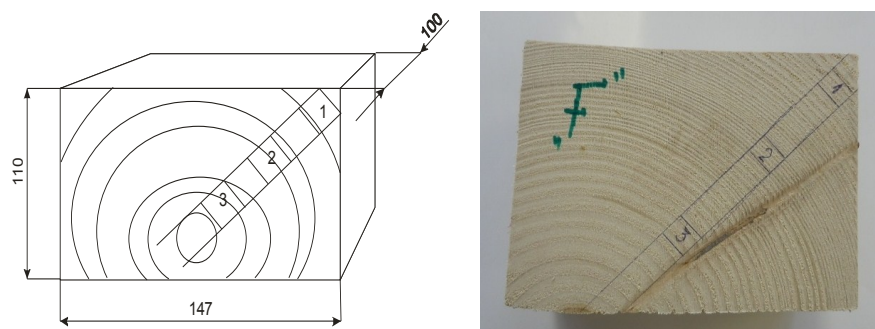
Obr. 4.9: Grafické schéma a pohled na vzorek E

Tab. 4.7: Průměrná šířka ročních přírůstků za jednotlivá období na vzorku E

| Rok | 0–10 | 11–20 | 21–30 | 31–40 | 41–50 | 51–60 | 61–70 | 71–80 | 81–90 | 91–100 | 103 |
|-----------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-----|
| mm | 35 | 35 | 30 | 21 | 19 | 21 | 18 | 11 | 20 | 20 | 4 |
| \bar{x} | 3,5 | 3,5 | 3,0 | 2,1 | 1,9 | 2,1 | 1,8 | 1,1 | 2,0 | 2,0 | 1,1 |

Vzorek F

Referenční vzorek recentního (současného) dřeva měl rozměry 100 x 147 x 100 mm. Vzorek měl tvar kváдру a byl vyřezán z kulatiny podle speciálního pořezového schématu (čtvrtkový). Vzorek byl čtyřstranně řezaný bez znaku vystavení dlouhodobé expozici. Barva dřeva byla krémověšedá, bez barevných změn, které by naznačovaly poškození dřevokaznými houbami. Přibližně v polovině vzorku byl patrný výskyt juvenilního dřeva s ročními přírůstky cca 6 mm. Věk vzorku byl odhadován na 55 roků. 30–50 % podíl letního dřeva byl pravděpodobně ovlivněný přítomností reakčního dřeva (případně blízkostí suku). Vzorek byl bez trhlín.



Obr. 4.10: Grafické schéma a pohled na vzorek F

Tab. 4.8: Průměrná šířka ročních přírůstků za jednotlivá období na vzorku F

| Rok | 0–10 | 11–20 | 21–30 | 31–40 | 41–50 | 51–55 |
|-----------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| mm | 65 | 30 | 20 | 18 | 23 | 20 |
| \bar{x} | 6,5 | 3,0 | 2,0 | 1,8 | 2,3 | 4,0 |

4.5 Příprava vzorků pro chemickou analýzu

4.5.1 Příprava vzorků pro stanovení množství uvolněných terpenů

Pro sledování změn množství terpenů ve dřevě v závislosti na čase jejich používání jako stavebního materiálu a vlivu termické úpravy na snížení obsahu terpenů v jedlovém dřevě, byla zvolena plynová chromatografie.

Na izolaci terpenů z různých matric (jehličí, listy, dřevo, med, víno ap.) se používají rozličné techniky, např. destilace vodní parou, superkritická destilace s oxidem uhličitým, SPE, SPME extrakce a extrakce solventy – hexanem, dichlórmetanem, acetonem, éterem, metanolem. Stanovení terpenů se provádí metodou plynové chromatografie (GC) nebo případně kombinací plynové chromatografie s hmotnostní spektroskopií (GC-MS), [46,47,48,49,50,51].

Šest vzorků jedlového dřeva bylo odebráno z trámů historických budov a jejich věk byl určen dendrochronologicky, tab. 4.1 (vzorek A – rok 1622/23, vzorek B – rok 1775/76, vzorek C – rok 1801/1802, vzorek D – rok 1841+, vzorek E – rok 1852+, vzorek F – rok 2011). Z trámů byly vymanipulovány vzorky o rozměrech 20 x 20 x 40 mm.

4.5.2 Příprava vzorků pro určení změny jedlového dřeva během jeho stárnutí

Z trámů jedlového dřeva skupin A-F byly vymanipulovány vzorky o rozměrech 10 x 10 x 10 mm. Ty byly na mlýně Polymix PX-MFC 90D (Kinematica AG, Switzerland) dezintegrovány na piliny a poté byly na zařízení Analysette 3 (Fritsch, Germany) sítované na jednotlivé frakce ($< 0,35$ mm, $0,35 - 0,50$ mm, $0,50 - 1,00$ mm, $> 1,00$ mm).

4.6 Příprava vzorků pro mechanické zkoušky

Hlavním záměrem experimentálních prací bylo na základě pevnosti zjistit, zda faktor času má významný vliv na změnu pevnosti jedlového dřeva, a tak zhodnotit jeho trvanlivost. Testovalo se 6 výběrových souborů označených písmeny A-F (tab. 4.1).

Teoretický rozbor

Při mechanickém namáhání konstrukčního prvku působí na dřevo vnější mechanické síly, které jej deformují pružně anebo pružně-plasticky, v závislosti na míře jeho vnitřního odporu. Reakce dřeva na mechanické namáhání závisí na jeho kvalitě, která je daná především jeho vnitřní strukturou, a to na makro-, mikro-, jakož i submikroskopické úrovni.

Chování dřeva při mechanickém namáhání kvalitativně a kvantitativně vyjadřujeme prostřednictvím základních mechanických vlastností – pevnosti, pružnosti, houževnatosti a plastičnosti [52]. Velmi důležitou a snad nejsledovanější vlastností dřeva je pevnost. Tato vlastnost slouží jako jedno z hlavních kritérií hodnocení kvality dřeva pro konstrukční účely.

Pevností dřeva rozumíme jeho odpor, resp. odolnost proti trvalému porušení soudržnosti jeho částic. Kvantifikujeme ji mezí pevnosti. Po překročení této hranice se materiál poruší. Způsob porušení (zlomení, roztrhnutí, usmýknutí, atd.) závisí na způsobu namáhání.

Na pevnosti jedlového dřeva se hlavní mírou podílejí jeho vláknité buňky – tracheidy, kterých je v jedlovém dřevě přibližně 95 %. Zastoupení letních a jarních tracheid v jedlovém dřevě může být rozdílné, což se zákonitě musí odrazit na hodnotách pevnosti. Protože se tyto rozdíly ve struktuře dřeva významně odrážejí také na jeho hustotě, z praktického hlediska považujeme za vhodné vyjádřit vliv struktury na pevnost dřeva právě prostřednictvím jeho hustoty, i když, jak uvádí Leclercq [53], rozdílná hustota dřeva nemusí vždy dostatečně vysvětlovat variabilitu jeho fyzikálních a mechanických vlastností. Platí to zejména v případech, kdy vlivem určitých faktorů dojde k takové degradaci buňkové stěny tracheid, která se negativně odrazí na pevnosti, ale na změně hustoty se to projevit nemusí.

4.7 Příprava vzorků pro tepelnou degradaci dřeva

Tepelná degradace dřeva se nejrychleji odráží v jeho úbytku na hmotnosti. Tato veličina je však ovlivněna i dalšími faktory, jako je vlhkost, hustota dřeva, jeho kvalita, geometrický tvar aj. Aby bylo možné eliminovat vliv těchto faktorů, vzorky, které byly podrobeny tepelné degradaci, byly klimatizovány nejprve na konstantní vlhkost. Vzorky byly dále kvalitativně vytříděny a váhovou metodou vyseparovány podle hustoty. U vytříděných vzorků se změřil jejich objem a přesně stanovila hustota. Věk vzorků byl vytříděn ve skupinách A, B, D, E a F, tab. 4.9. Posuzovány byly vzorky pouze s vysokou hustotou $450 \pm 25 \text{ kg/m}^3$ v těchto skupinách.

Tab. 4.9: Rozměry a datace skupiny vzorků A-F

| Datace - věk | Počet vzorků [ks] | Rozměry [cm] |
|-------------------|-------------------|--------------|
| A (1622/23) | 12 | 4,1×2×2 |
| B (1775/76) | 12 | 3,7×2,3×2 |
| D (po roce 1841+) | 12 | 4×2×2 |
| E (po roce 1852+) | 12 | 4×2,3×2 |
| F (21. stol.) | 12 | 4×2×2 |

5 Metody práce

5.1 Metoda dendrochronologického datování

Pro stanovení stáří dřeva byla použita metoda dendrochronologického datování, která využívá letokruhové analýzy k datování událostí [54]. Pro datování bylo použito standardních metod chronologie šířek letokruhů, popsanych v pracích [55,40]. Tyto metody zahrnují:

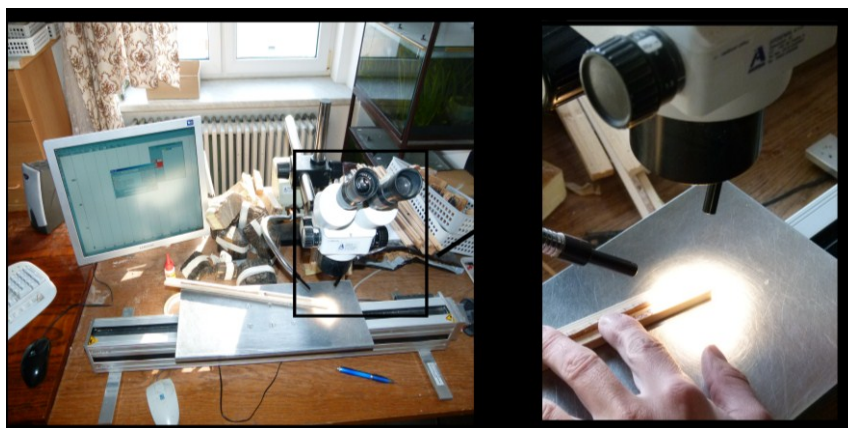
- 1) měření šířek letokruhů,
- 2) relativní synchronizaci získaných letokruhových řad,
- 3) standardizaci letokruhových řad,
- 4) pokus o absolutní datování vůči standardním chronologiím jednotlivých dřevin.

Měření šířek letokruhů na vývrtech bylo provedeno pomocí polohového měřicího zařízení TimeTable s automatickým vstupem dat do počítače. Stůl (TimeTable) je vybaven posuvným šroubovým mechanismem a impulsmetrem zaznamenávajícím interval posunu desky stolu a tím i šířku letokruhu. Pomocí šroubového mechanismu se vzorek posouval vždy o jeden letokruh a každý roční přírůstek byl potvrzen kliknutím tlačítka myši. Šířky letokruhu byly okamžitě zapisovány do počítače v patřičném formátu. Letokruhové křivky byly navzájem porovnány a relativně synchronizovány. Soubory navzájem synchronních křivek byly průměrovány do sumárních křivek.

Před vlastním průměrováním synchronizovaných letokruhových křivek byly z jednotlivých letokruhových řad odstraněny dlouhodobé růstové trendy. Pro jejich eliminaci byla zvolena spline funkce o délce 25 let. Pokus o absolutní datování byl proveden pomocí datovacího programu PAST, který zahrnuje verifikaci dat a synchronizaci letokruhových řad se standardní chronologií. Při použití tohoto programu byla míra podobnosti porovnávaných řad, resp. chronologií, posuzována pomocí korelačního koeficientu a koeficientu souběžnosti (Gleichlaufigkeit) pro standardizaci pomocí vysokofrekvenčních filtrů dle Hollsteina [56] a metodou Baillie & Pilcher [57]. Nalezená synchronní pozice byla ověřena v programu Cofecha, kde byl vypočítán korelační koeficient bez použití výše uvedených filtrů.



Obr. 5.2: Dřevěné vodící lišty pro upevnění vývrtu a seříznutí hrany pro vytvoření čelního řezu s lepší čitelností hranice letokruhů [39]



Obr. 5.3: Měřicí stůl se šroubovým mechanismem a impulsmetrem s výstupem do počítače s datovacím programem PAST [39]

5.1.2 Použitá standardní chronologie a srovnávací letokruhové řady

Aby bylo možné dřevo dendrochronologicky datovat, musí být pro daný druh vytvořena tzv. standardní chronologie (srovnávací letokruhové řady). Pro datování zkoumaného jedlového dřeva byla použita standardní chronologie jedle pro Moravu (je-mo05-1056-1996), tento standard byl sestaven v Botanickém ústavu AV ČR v Průhonicích.

5.2 Metoda stanovení sorpčních vlastností dřeva

Pro experimentální posouzení a potvrzení hypotézy o snížení sorpčních vlastností dřeva starého ze 17. stol. (tab. 4.1) byly sestaveny sorpční izotermy pro všechny zkoumané druhy skupin dřeva při konstantní teplotě 20 °C.

Zkušební vzorky byly nejprve vysušeny na vlhkost odpovídající absolutně suchému stavu. Toho bylo dosaženo umístěním vzorků do sušárny Memmert UNB 500, kde byly vysušeny na vlhkost 0 % při teplotě 103 ± 2 °C. Proces sušení byl sledován kontrolním vážením a ukončen v době, kdy dvě po sobě jdoucí vážení nevykazovala větší rozdíl než 0,01 g. Vzorky zbavené veškeré vázané vody byly označeny, změřeny v podélném (L), radiálním (R) a tangenciálním směru (T) s přesností na 0,01 mm a zváženy na laboratorních vahách s přesností na 0,01 g. Z těchto údajů byla vypočítána hustota dřeva v absolutně suchém stavu dle ČSN 49 0108.

Pro vytvoření potřebné relativní vlhkosti vzduchu (φ) a tím získání rovnovážných bodů pro izotermu byla použita metoda využívající nasycené roztoky solí (ČSN EN ISO 12571) – MgCl_2 , $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, NaCl , KCl , K_2SO_4 . Vzorky byly umístěny do baněk s daným roztokem soli určující relativní vzdušnou vlhkost a uloženy do hygrotérnické komory ERICHSEN Hygrotherm 519, obr. 5.4 a 5.5. Tím bylo dosaženo 5 rozsahů φ (33 %, 55 %, 75 %, 88 %, 97 %) při teplotě 20 °C a za normálního atmosférického tlaku. Po ustálení hmotnosti vzorků dřeva při dané φ a tím dosažení stavu vlhkostní rovnováhy (SVR) byla gravimetricky stanovená rovnovážná vlhkost dřeva (RVD) dle ČSN 49 0103 a byla vypočítána dle rovnice 5.1. Tyto údaje sloužily jako podklad pro zkonstruování grafu sorpčních izoterm.

$$w = \frac{m_w - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (5.1)$$

kde: w = RVD...rovnovážná vlhkost dřeva [%]

m_w ...hmotnost vlhkého dřeva [g]

m_0 ...hmotnost absolutně suchého dřeva [g]

Pro stanovení desorpční izotermy byly stejné zkušební vzorky umístěny do klimatizační komory WEISS WK 600 S a nasyceny v prostředí 100% vzdušné vlhkosti. Po dosažení nasyceného stavu byly vzorky vyjmuty, aby se odstranila přebytečná voda, a umístěny do baněk s příslušnou solí (obr. 5.4 a 5.5), kde byly ponechány, dokud neby-

lo u všech solí dosaženo rovnovážného stavu, čili dokud se výsledky dvou po sobě následujících vážení nelišily o více než 1 %. Následně byly vzorky zváženy pro zjištění hmotnosti vlhkého dřeva a uloženy do sušicí skříně, kde dosáhly bezvodého stavu. Po zvážení byla vypočítána RVD při desorpci podle rovnice 5.1 a sestrojena desorpční izoterma.

Pro srovnání zakreslených sorpčních a desorpčních křivek pro teplotu 20 °C dřeva starého a referenčního byl použit hysterezní koeficient, který umožňuje poznat o kolik stabilnější je dřevo ve vztahu ke změnám relativní vlhkosti, následkem kterých dřevo přechází ze stavu adsorpce do stavu desorpce a zpět. Hysterezní koeficient byl vypočítán podle vztahu 5.2 [10].

$$c_H = \frac{RVD_a}{RVD_d}, \quad (5.2)$$

kde: c_H ...hysterezní koeficient – hystereze sorpce

RVD_a ...rovnovážný obsah vlhkosti při absorpci [%]

RVD_d ...rovnovážný obsah vlhkosti při desorpci [%]



Obr. 5.4: Zkušební vzorky umístěné v baňkách s nasyceným roztokem příslušné soli ($MgCl_2$ – 33 %, $Na_2Cr_2O_7$ – 55 %, $NaCl$ – 75 %, KCl – 88 %, K_2SO_4 – 97 %) a hygrometrická komora ERICHSEN Hygrotherm 519



Obr. 5.5: Detail uložení zkušebních vzorků v baňce nad nasyceným roztokem síranu draselného - K_2SO_4 - pro 97 % relativní vzdušnou vlhkost

5.3 Metoda hodnocení struktury dřeva

Pro sledování struktury dřeva zabudovaného v historických stavbách byla použita mikroskopická technika, která by měla dát odpověď na otázku, zda dřevo „dlouhodobě“ zabudované v historických stavbách vykazuje znaky, které by mohly souviset s jinými environmentálními podmínkami růstu dřeva v období, kdy bylo dřevo zpracováno na konstrukční prvky a zabudováno do historických staveb. Současně mikroskopická technika ukáže, zda dřevo vykazuje strukturální změny, které by souvisely s dlouhodobým zabudováním dřeva v historické stavbě.

Při volbě mikroskopické techniky bylo potřebné zachovat dřevo v nativním stavu, tzn. ve stavu, v jakém bylo používáno v historických stavbách. Bylo nevyhnutelné, aby při přípravě preparátů dřeva nevznikaly umělé artefakty, které by se nedaly odlišit od případných přirozených změn ve dřevě. Nejjednodušší bylo použití stereomikroskopie, pracující s odraženým světlem, které nevyžaduje žádnou úpravu dřeva před pozorováním. Touto technikou však bylo možné reálně dosáhnout zvětšení objektivu 100x, což nepostačuje na analyzování jemných struktur dřeva.

Mokr   p  prava vzorků vylučuje použit   transmisní sv  teln   mikroskopie pracující s procházejícím světlem. Tento typ mikroskopie si vyžaduje p  pravu tenkých mikroskopických preparátů (tloušťka 15–20 μm), kter   neni moţn   p  pravit bez hydrotermické úpravy d  va. Tato technika sice poskytuje dostatečné zvětšení pozorovaného objektu, avšak při p  prav   preparátů d  va (m  kk  n   vařen  m v polárních kapalinách a n  sledn   odvodňování) m  ţe způsobit v  znamn   morfologické artefakty.

Nejvhodnější technikou pro pozorování struktury d  va se jeví skenovací elektronov   mikroskopie (SEM), obr. 5.6, u kter   výhody p  evaţuj   nad nevýhodami. Výhodou je velk   zvětšení pozorovaného objektu (re  ln   a   10 000x) a velk   hloubka ostrosti sniman  ho objektu. P  prava preparátu (objektu) je na jedné straně jednoduch   (řezání, š  p  n  , lámání, r  zn   upraven   povrchy technologickými procesy apod.) - obr. 5.6, na druh   straně je u d  va jako nevodivého materiálu pot  ebn   sledované povrch upravit pokoven  m ušlechtil  m kovem (zlato, platina, jejich slitiny apod.) a t  m zabezpe  t elektrickou vodivost pozorovaného povrchu. Skenovací elektronov   mikroskop a i pokovovací zařizení jsou nepom  rn   dražší ve srovnání se světelnými mikroskopy. Když vlhkost d  va dodaných vzorků byla okolo 15 %, bylo vytvořen   řezan   plochy v odpovídající kvalitě problematick  . Zlepšit kvalitu řezání bylo mo  zn   vlh  en  m řezaného d  va. Tato alternativa byla zavrhnuta vzhledem k mo  znosti vzniku výrazných artefaktů souvisejících se změnou vlhkosti d  va (trhliny vznikající vlhkostním namáháním d  va). Proto byla zvolena pro sledování struktury d  va p  prava povrchu š  p  n  m při dané vlhkosti d  va.

Š  p  n   při p  vodn   vlhkosti d  va (15 %) je mo  zn   pova  zovat za nejšetnější dělení d  va, protože d  vo neni vlhkostn   namáháno,   im   je mo  zn   se vyhnout tvorbě p  padn  ch sekundárních trhlin, kter   by se těžko odlišily od trhlin, kter   vznikají při dělení d  va š  p  n  m. Schéma manipulace blo  k   a p  prava sledovaných povrchů je znázorněna na obr. 5.7. Z původního vzorku byla vymanipulov  na radiální prizma o rozměrech 10 × 13 × poloměr (L×T×R směr). Z dan   radiální prizmy byly ze tři poloh vysekunuty hranolky, obr. 5.7:

poloha 1 - obvodová zóna 5 mm pod povrchem vzorku,

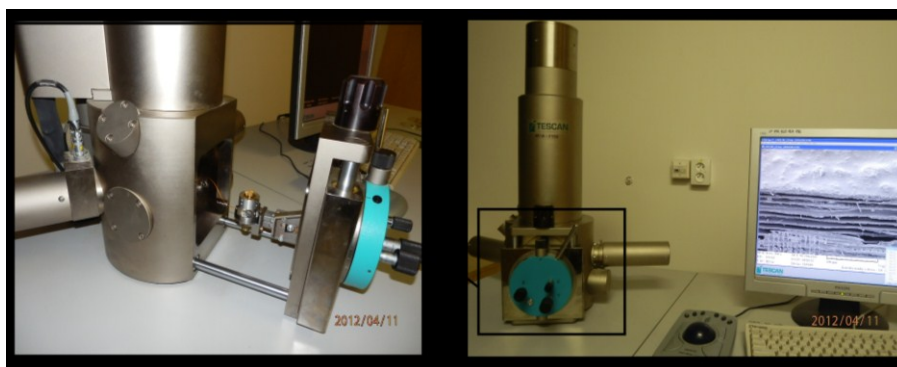
poloha 2 - středová zóna cca 50 mm od povrchu vzorku,

poloha 3 - juvenilní dřevo cca 100 mm od povrchu vzorku.

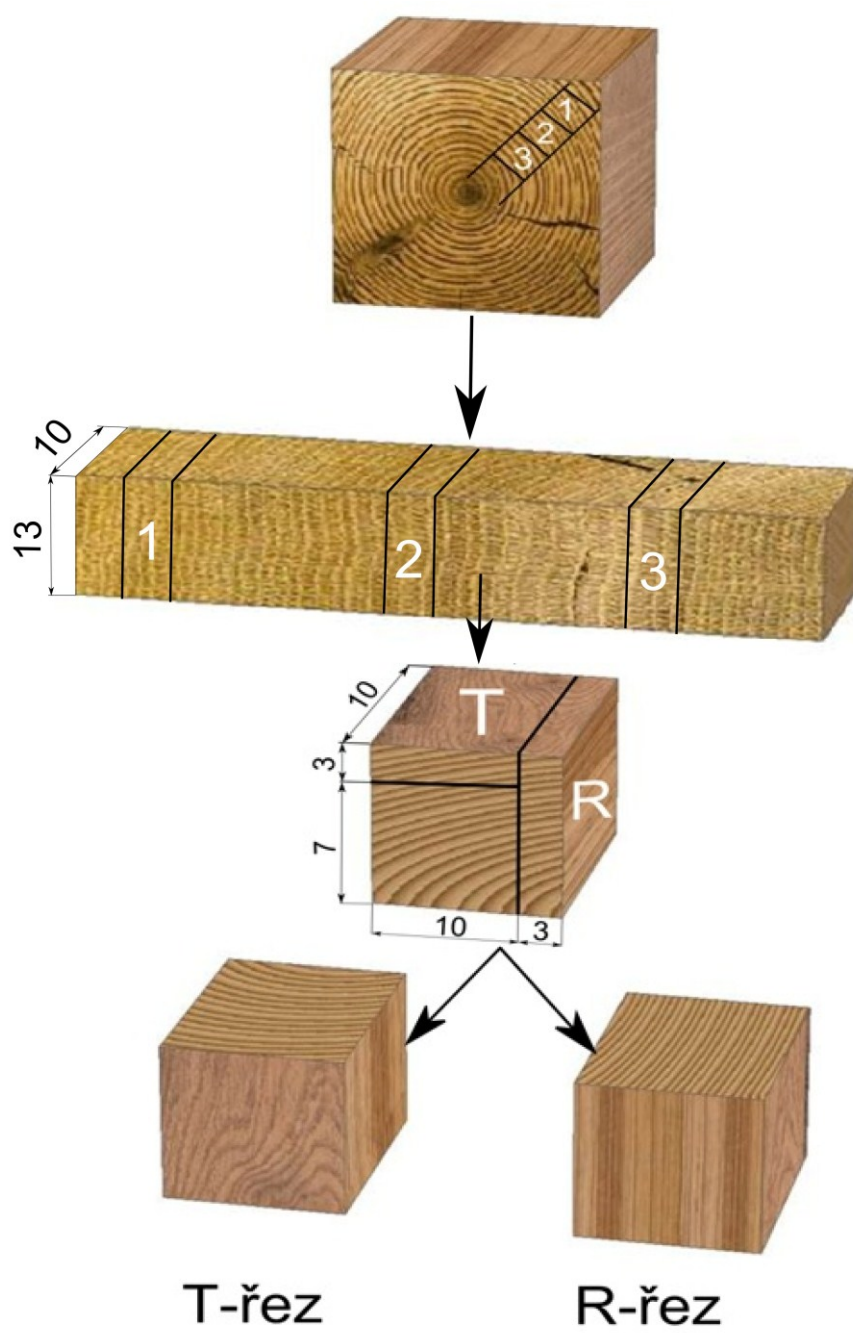
Z připravených hranolků byly štípáním připraveny radiální a tangenciální plochy (preparáty) pro pozorování. Preparáty s radiální, resp. tangenciální plochou byly upevněny na nosič preparátů a následně pokoveny zlatem.

Pozorování připravených objektů bylo zaměřeno na:

- průběh příčných a podélných fraktur na vláknech (tracheidách)
- tvorbu trhlin v buněčných stěnách vláken
- průběh trhlin v dřevných paprscích (mezi parenchymatickými buňkami a v buněčných stěnách parenchymu)
- změny na ztenčeninách (dvojtečkách)
- případně jiné morfologické změny (degradace dřeva houbami, přítomnost hyf apod.)



Obr. 5.6: Elektronový mikroskop se softwarem a detailem upínací hlavy mikroskopu



Obr. 5.7: Schéma přípravy pozorovaných objektů zkoumaných dřev A-F

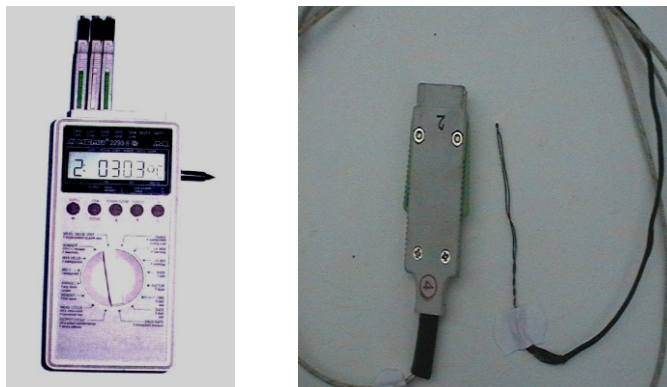
5.4 Metoda chemické analýzy dřeva

5.4.1 Stanovení uvolněných terpenů při dlouhodobém používání a termické ochra- ně dřeva

Vzorky o rozměrech $20 \times 20 \times 40$ mm byly podrobeny termické úpravě po dobu 10 hodin v sušárně Memmert UNB 200 (Memmert GmbH, Germany) při teplotách 60 °C, resp. 120 °C. Teploty v sušárně i uvnitř jednotlivých vzorků byly měřeny termočlánky typu NiCr-Ni (nikl – slitina chromu a niklu) s tloušťkou 0,4 mm na přístroji Almemo 2290-8 (Ahlborn, Germany), obr. 5.8. Vzorky termicky neupravené i upravené byly dezintegrovány na piliny v mlýně Polymix PX-MFC 90D, obr. 5.9, (Kinematica AG, Switzerland) a síťované na jednotlivé frakce ($< 0,35$ mm, 0,35–0,50 mm, 0,50–1,00 mm $> 1,00$ mm) na zařízení Analysette 3 (Fritsch, Germany), obr. 5.9.

Frakce 0,35–0,50 mm (10 g) získaná na mlýně Polymix PX-MFC 90D, (obr. 5.9), byla extrahována hexanem (100 ml) 24 h na vibračním zařízení Promax 2020 (Heidolph, Germany), částečně zahuštěná ve vakuu při teplotě 27 °C a konečný objem vzorku (1 ml) byl získán v jemném proudě dusíku. Analýza plynovou chromatografií s hmotnostní detekcí (GC-MS) byla vykonána na přístroji HP 7890A-5975C VL MSD (Agilent Technologies, USA), obr. 5.10, s kolonou HP-5 MS 30 m x 250 μ m x 0,25 μ m (Agilent J&W, USA).

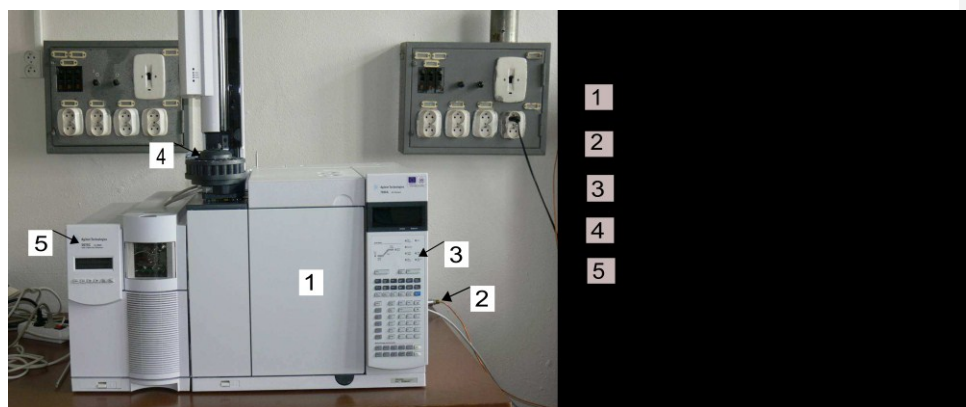
Jako nosný plyn bylo použito hélium při průtoku 1,5 ml/min. Teplotní program začínal při teplotě 75 °C (5 min), potom následovalo zvyšování teploty při rychlosti 7 °C/min do 140 °C, potom 20 °C/min do 250 °C a výdrž 5 min. Teplota split-splitless injektoru (nástřiková komora) byla 250 °C, MS-transfer 280 °C. MS detektor pracoval v módě elektronové ionizace při energii 70 eV, v rozsahu m/z 30-330. Injektované množství vzorku bylo 1 μ l při splitu 1:20. Identifikace jednotlivých látek byla provedena na základě porovnání retenčních časů se standardy a pomocí hmotnostních spekter v knižnici NIST05. Množství jednotlivých látek bylo stanovené metodou kalibrační závislosti.



Obr. 5.8: Měřicí přístroj ALMEMO 2290-8 od firmy AHLBORN s detailem konektoru ZA 9020 FS spolu s termočlánkem NiCr-Ni



Obr. 5.9: Zařízení na síťové třídění frakcí Analysette 3 (a), mlýn Polymix PX-MFC 90D s detailem nožů (b)



Obr. 5.10: Zařízení pro analýzu plynovou chromatografií, plynový chromatogram

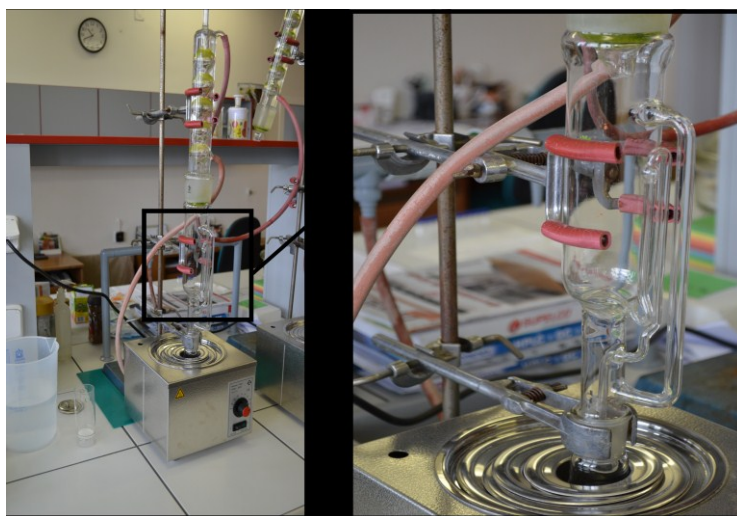
5.4.2 Analýza chemické změny jedlového dřeva během jeho stárnutí

Extraktivní látky byly stanovené v Soxhletově aparatuře, (obr. 5.11), směsí etanolu a toluenu podle normy ASTM D 1107-96 (2007). Lignin byl stanovený dle normy ASTM D 1106-96 (2007), celulóza podle Seiferta [58], holocelulóza dle Wisea *et al.* [59], hemicelulózy výpočtem jako rozdíl holocelulózy a celulózy.

Při izolaci dioxanového ligninu byla použita extrahovaná dřevní moučka (frakce 0-0,355 mm). Izolace probíhala v dusíkové atmosféře za podmínek: hydromodul 10 g v 200 ml směsi dioxan-voda (9:1), doba působení 5 h při teplotě 80 °C. Distribuce molových hmotností připravených dioxanových ligninů byly stanoveny metodou gelové permeační chromatografie na koloně Separon Hema S-300 (Tessek, Česká republika), v mobilní fázi 0,005 M LiBr v N, N-dimetylformamide Kačík *et al.* [60]. Údaje byly snímány programem „ChemStation” (Agilent Technologies, USA), obr. 5.12a, výpočty molových hmotností a polydispersity byly provedeny pomocí programu “Clarity GPC Module” (DataApex, Česká republika). Systém byl kalibrován polystyrénovými standardy s molovými hmotnostmi v rozsahu 500-98 900 g.mol⁻¹ (Tosoh, Japonsko).

Při analýze celulózy bylo stanovení průměrného polymerizačního stupně (PPS), polydisperzity, hodnot M_w , M_n , M_z , M_{z+1} provedeno gelovou permeační chromatografií (GPC), kde byla použita metoda derivatizované celulózy ve formě trikarbanilátů (CTC) na koloně Plgel 10 μ m MIXED B, 300 x 7.5 mm (Polymer Laboratories, USA) v tetrahydrofuranu Kačík *et al.* [61]. Údaje z detektoru byly vyhodnocovány programem ChemStation (Agilent Technologies, USA), obr. 5.12a. Hodnoty molových hmotností a PPS byly vypočítány po konverzi dat do programu Clarity (DataApex, Česká republika). Kolona byla kalibrována standardy polystyrenů (Polymer Laboratories, USA). Ze získaných údajů o retenčních dobách při GPC polystyrenových standardů byla sestrojena kalibrační závislost $\log(M) = f(V_e)$, Kačík *et al.* [61]. Pro stanovení molových hmotností byla použita univerzální kalibrace s koeficienty pro CTC: $K = 2,01 \cdot 10^{-5}$ a $\alpha = 0,92$ [62].

Gelová permeační chromatografie hemicelulóz byla provedena na koloně TSK 3000 PW v mobilní fázi 0,1 M NaOH za použití RI detektoru, obr. 5.12b. Kalibrace byla provedena standardními látkami se známými molovými hmotnostmi – polyetylen-glykoly a dextransy v rozsahu 200 až 150 000. Kvalitativní a kvantitativní analýza sacharidů ve vzorcích byla provedena metodou vysoce účinné kapalinové chromatografie (HPLC) podle metody ASTM E 1758-01 (2003). Vzorky byly hydrolyzovány dvojstupňovým postupem. V prvním stupni se použila 72% H_2SO_4 při teplotě 30 °C v trvání 1 hodiny, ve druhém se vzniklé oligomery dehydrolyzovaly na monosacharidy po zředění na 4% H_2SO_4 při teplotě 121 °C během 1 hodiny. Analýza byla provedena na chromatografu Agilent 1200 HPLC s kolonou BioRad Aminex HPX-87P, obr. 5.12a,b, (BioRad, USA) při teplotě 80 °C a při průtoku mobilní fáze 0,6 ml.min⁻¹.



Obr. 5.11: Soxhletova aparatura pro stanovení extraktivních látek, směsí etanolu a toluenu



Obr. 5.12a: Chromatograf Agilent 1200 HPLC (a) a program „ChemStation” Agilent Technologies, USA (b)



Obr.5.12b: Chromatograf Agilent 1200 HPLC s detailem chromatografické kolony Bi-oRad Aminex HPX-87P

5.5 Metoda měření mechanických vlastností dřeva

Experimentálně se zjišťovala mez pevnosti jedlového dřeva, a to pevnost:

- v tlaku rovnoběžně s vlákny (ČSN 49 0110),
- v tahu rovnoběžně s vlákny (ČSN 49 0113),
- ve smyku rovnoběžně s vlákny (ČSN 49 0118),
- ve statickém ohybu kolmo na vlákna (ČSN 49 0116).

Z každého výběrového souboru, pro každý druh zkoušky, bylo připravených 30 zkušebních těles, dohromady tedy 720 těles. Příprava zkušebních těles a samotné zkoušení pevnosti při daných způsobech zatížení byly v souladu s platnými normami. Tvar a rozměry těles jsou znázorněné na obr. 5.13–5.16. Všechna tělesa byla před samotnou zkouškou klimatizována při relativní vlhkosti vzduchu $\varphi = 65 \%$ a teplotě $t = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Vlhkost těles po klimatizaci byla $12 \pm 0,5 \%$.

Mez pevnosti v tlaku, tahu a smyku byla vypočítána podle rovnice:

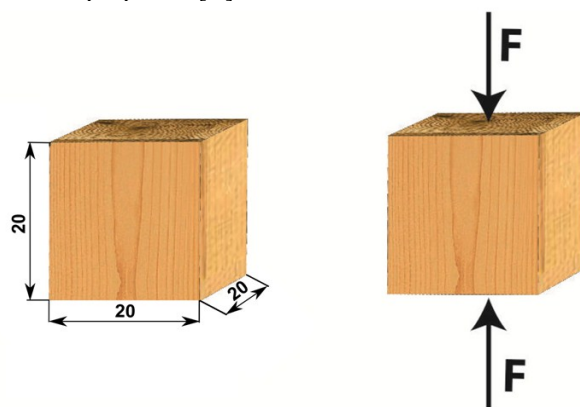
$$\sigma_p = \frac{F_{\max}}{S}, \text{ resp. } \tau_p = \frac{F_{\max}}{S}, \quad (5.3)$$

kde: F_{max} ...maximální síla [N]
 S ...plocha, na kterou působila síla [m²]

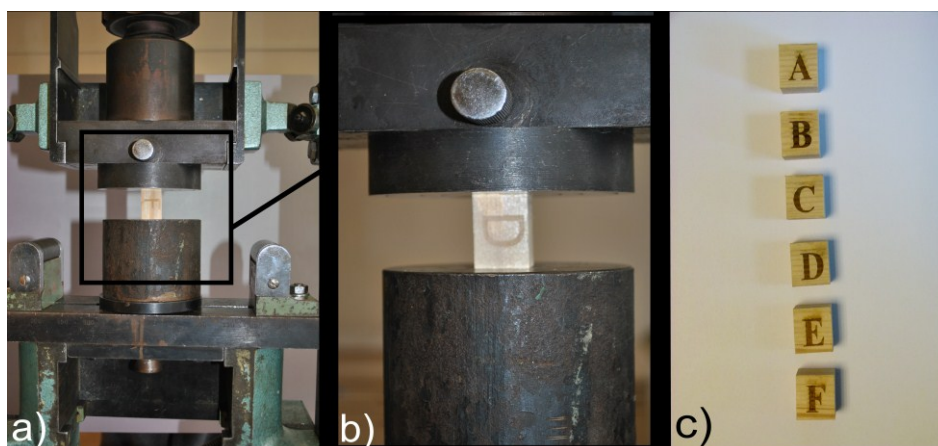
Mez pevnosti při tříbodém ohybu byla vypočítána podle rovnice:

$$\sigma_p = \frac{3 \cdot F_{max} \cdot l_0}{2 \cdot b \cdot h^2}, \quad (5.4)$$

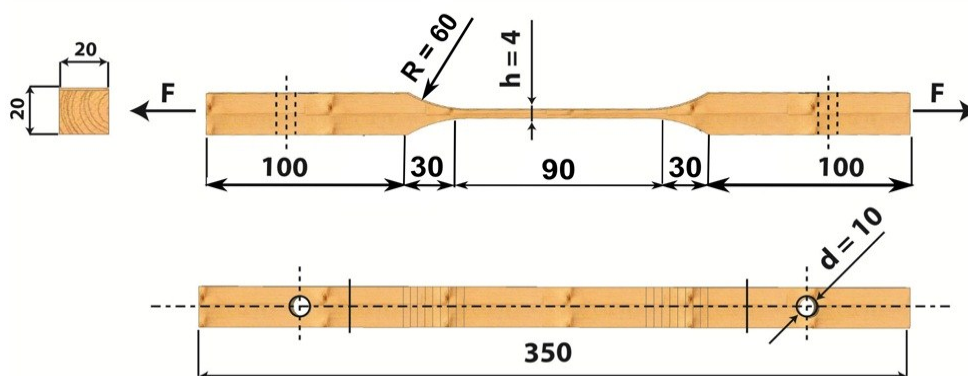
kde: F_{max} ...maximální síla [N]
 b ...šířka tělesa [m]
 h ...výška tělesa [m]
 l_0 ...vzdálenost mezi podpěrami [m]



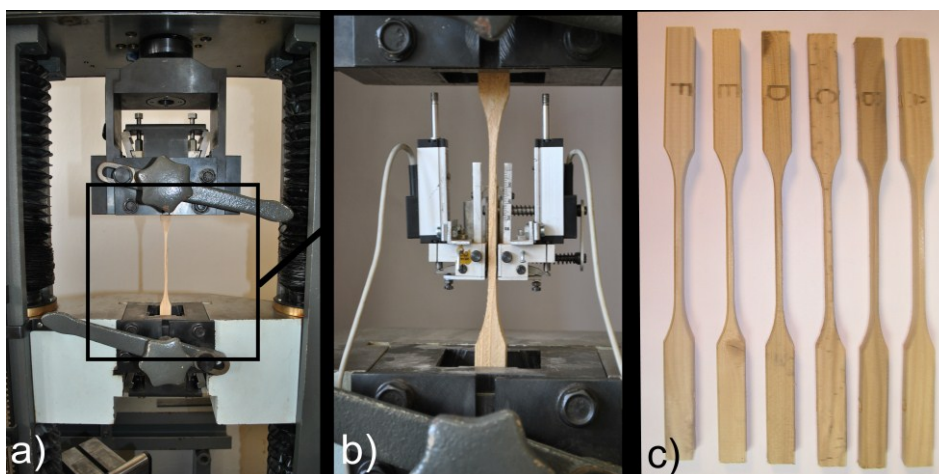
Obr. 5.13a: Schéma rozměrů zkušebního tělesa pro zjišťování pevnosti v tlaku ve směru vláken



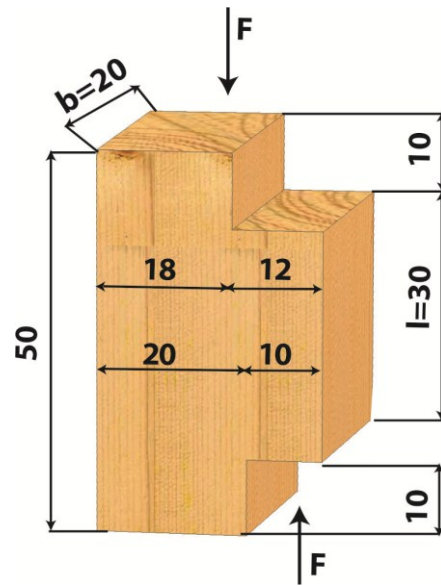
Obr. 13b: Zkušební zařízení FPZ – 100(a) s detailem uchycení tělesa (b) a foto zkušebních těles daných skupin A-F



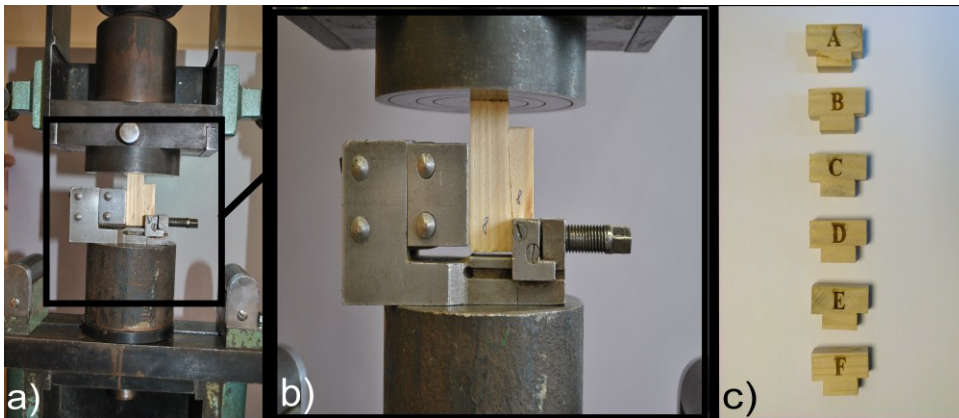
Obr. 5.14a: Schéma zkušebního tělesa pro zjišťování pevnosti v tahu ve směru vláken



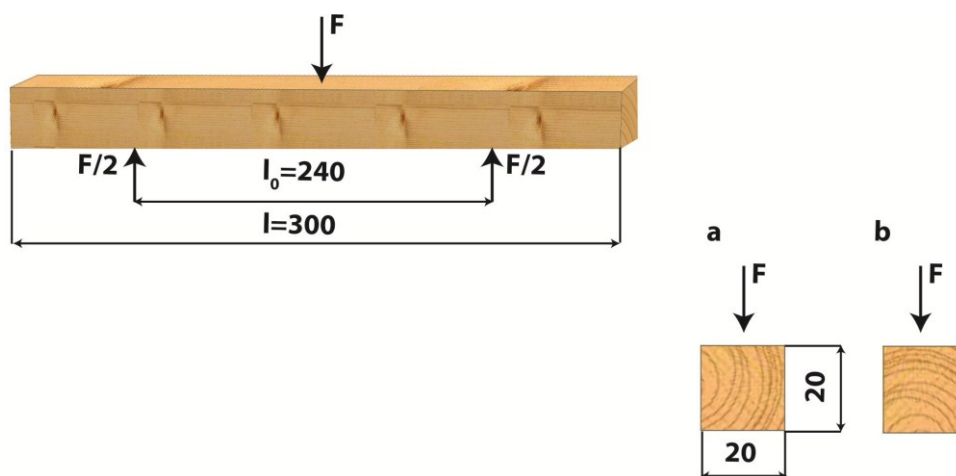
Obr. 14b: a) zatížení zkušebního tělesa v tahu na testovacím stroji FPZ – 100, b) detail principu snímání síly a deformace zařízením AIMENO s indukčními snímači deformace od firmy ALHORN, c) detail testovaných vzorků



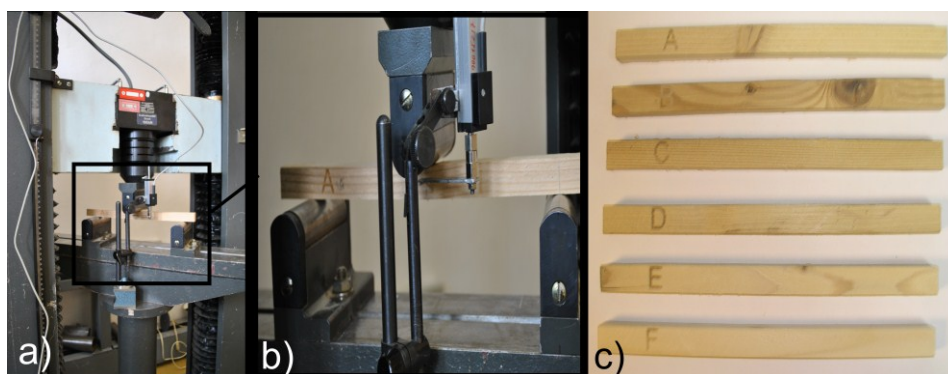
Obr. 5.15a: Zkušební těleso pro zjišťování pevnosti ve smyku ve směru vláken



Obr. 5.15b: Zatížení tělesa ve smyku na zařízení FPZ – 100 (a), detail uchycení těles v přípravku zařízení a c) zkušební tělesa pro zatížení ve smyku



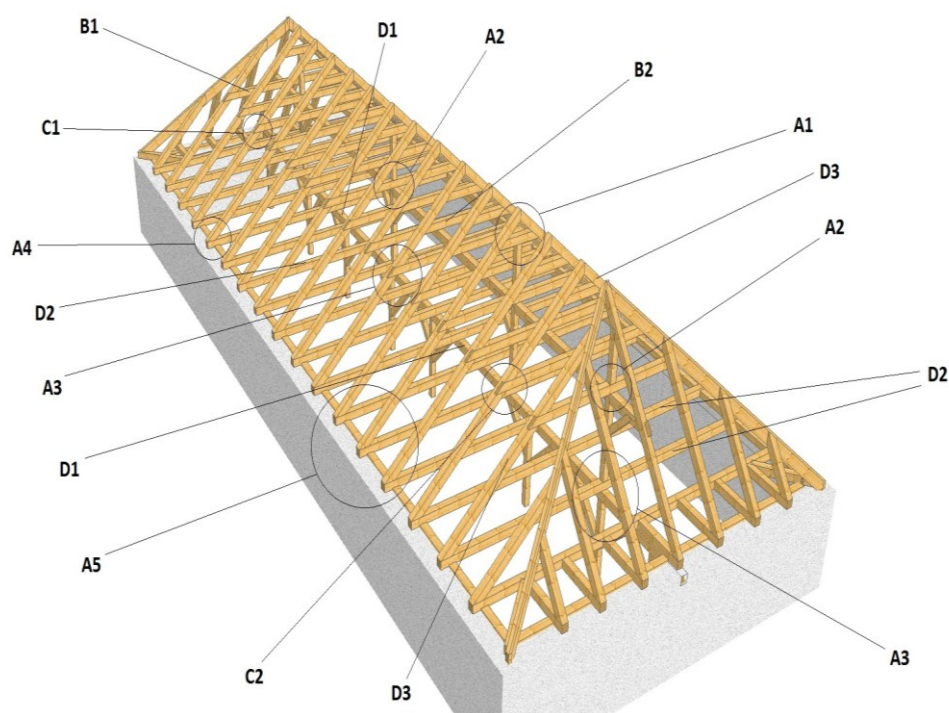
Obr.5.16a: Zkušební těleso pro zjišťování pevnosti ve statickém ohybu kolmo na vlákna
a) tangenciální směr, b) radiální směr



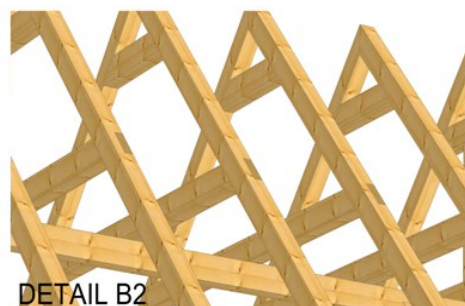
Obr. 5.16b: Zkušební zařízení FPZ – 100 (a), detail uchycení tělesa při třibodovém ohybu, c) reálná zkušební tělesa pro zatížení v ohybu

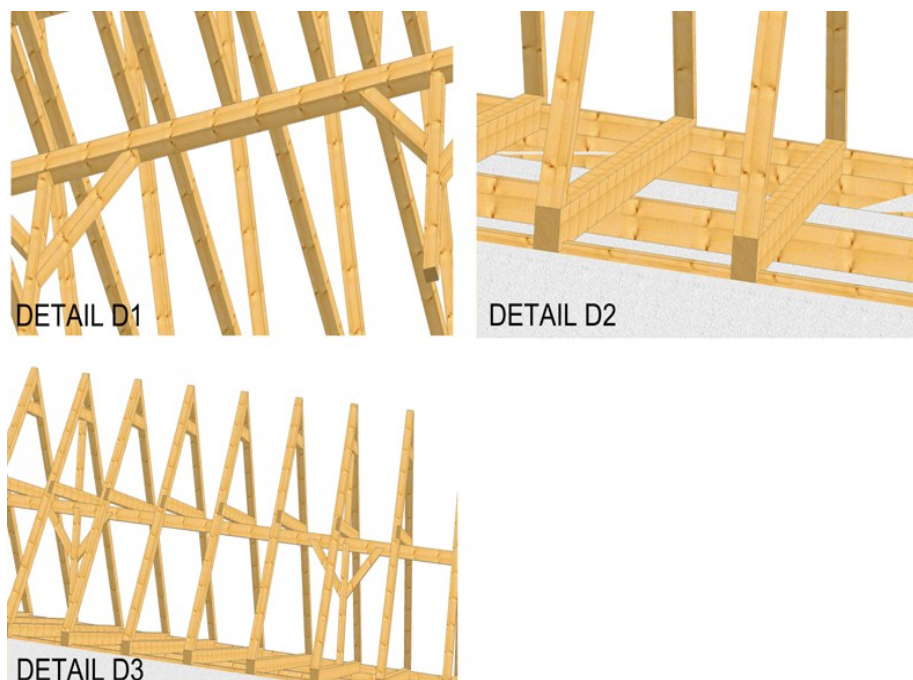
Vybrané pevnostní zkoušky (tlak, tah, smyk a ohyb) korespondují s nejčastějšími způsoby zatížení v krovové konstrukci většiny historických staveb. Krov je nosná konstrukce střechy, je součástí téměř každé stavby. Historické krovy se v naprosté převaze stavěly ze dřeva [45]. Pro statické působení konstrukce krovu jsou charakteristické šikmé prvky namáhané tlakem a ohybem (obr. 5.17b, detail A – tlak, D - ohyb). Při sklonu $50^\circ - 60^\circ$ se větší část zatížení přenáší tlakem, kterému při řádově stejných pevnostech v tlaku i ohybu dřevo velmi dobře odolává [45].

Ve vývoji krovu je zřejmá tendence vytvářet tahové konstrukce, v nichž jsou dřevěné prvky pokud možno namáhány tlakem [45]. Tahové zatížení (detail B, obr. 5.17b) přenášejí v krovu zejména kleštiny, zajišťující přímé ztužení plných vazeb. Obvykle jsou kleštiny zdvojené, někdy zapuštěné do krokví a sloupků [45]. Rovněž hambálek přenáší tahové i tlakové zatížení (detail B, obr. 5.17b). Hambálek je charakteristickým prvkem většiny historických prvků, který přenáší zatížení od krokví do vaznic, u krovů s podepřenými hambálky. Na smyk jsou namáhány zejména tesařské spoje (detail C, obr. 5.17b). A při sklonu šikmého nosníku 30° převažuje zatížení ohybem (detail D, obr. 5.17b), které klade větší nároky na dimenze prvku.



Obr. 5.17a: Celkový pohled na konstrukci krovu s vyznačenými detaily zatížení





Obr. 5.17b: Grafické znázornění krovu s detaily jednotlivých zatížení (detail A-D)

5.6 Metoda tepelné degradace dřeva v závislosti na věku

Při experimentech simulujících tepelné zatížení bylo použito jednoduché zařízení skládající se z vah, azbestových tabulí na ochranu vah před tepelným zářením, stojanu, nosného rámu, zdroje sálavého tepla – zářiče a držáku na zkušební tělíska. Aparatura (obr. 5.18) je vybavena elektrickými váhami Sartorius Basic plus typ BDBC od firmy Sartorius AG, I. třídy přesnosti s neautomatickou činností. Váhy mají certifikát, který potvrzuje shodu vlastností tohoto typu vah s právními předpisy, technickými normami a technickými dokumenty STN EN 45 501. Měří s přesností na dvě desetinná místa a maximální naměřená hmotnost na tomto typu vah je 2 100 g.



Obr. 5.18: Testovací zařízení s elektrickými váhami Sartorius Basic

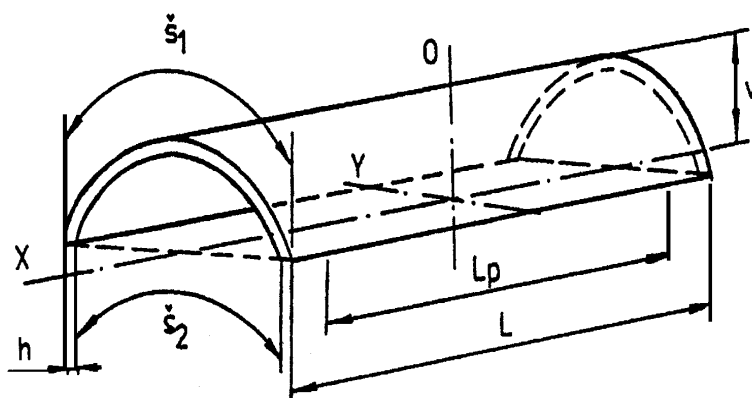
Zdroj sálavého tepla

Jako zdroj sálavého tepla byl použit infračervený zářič, obr. 5.19. Přenos tepla probíhal na principu šíření elektromagnetického záření vlnových délek 0,75 – 12 J.m, které se při absorpci tuhou látkou přeměnilo na teplo. Při experimentu byl použit zářič typové řady T-5 firmy Elektro Prag. Zářič měl tvar roviny zahnuté do mírného oblouku ve směru podélné osy tělesa. Samotné záření vydávala čelní stěna, zadní stěna a čelní hrana. Boční hrany zářiče pro jejich malý význam pro přenos záření byly zanedbány.

Těleso zářiče bylo zhotoveno ze speciální keramické hmoty - kordieritu. Jde o hmotu velmi odolnou vůči náhlým změnám teplot s rozdílem teplot větším než 70 °C a také o hmotu odolnou vůči vysokým teplotám (1100 °C). Těleso zářiče bylo vybaveno tenkou hliníkovou parabolou. Elektromagnetické vlnění patří v přírodě k nejběžnějším, protože každé těleso je jeho zdrojem. Rozdělení energie podle délek, anebo podle frekvence, závisí na teplotě tělesa. S teplotou se mění i jeho barva. Rozměry a parametry zářiče jsou uvedeny v tab. 5.1.

Tab. 5.1: Parametry a rozměry zářiče

| | |
|---------------------------|------------------------------------|
| Celková délka | $l = 245 \text{ mm}$ |
| Pracovní délka | $l_p = 200 \text{ mm}$ |
| Vnější šířka | $\check{s}_1 = 85 \text{ mm}$ |
| Vnitřní šířka | $\check{s}_2 = 64 \text{ mm}$ |
| Tloušťka | $h = 5 \text{ mm}$ |
| Tloušťka | $v = 30 \text{ mm}$ |
| Teplota (30 mm od zářiče) | $t = 130 \text{ }^{\circ}\text{C}$ |



Obr. 5.19: Schéma zdroje sálavého tepla

Zářič sálavého tepla byl zapnut a nechal se rozehtát po dobu 15 min. Po uplynutí této doby, se zkušební těleso umístilo do stojanu a bylo vystaveno sálavému teplu po dobu 3 min. Z každé skupiny (A-F) bylo testováno 12 zkušebních těles. Čas působení byl konstantní, a to 3 minuty. Každých 15 s byl sledován a zaznamenáván úbytek na hmotnosti (vzorec 5.5).

Úbytek na hmotnosti

Při působení tepelného zářiče byl zaznamenáván úbytek na hmotnosti v předem definovaném čase působení. Z výsledků byl poté vypočítán relativní úbytek na hmotnosti dle vzorce 5.5:

$$\delta_m(\tau) = \frac{\Delta m}{m(\tau)} \cdot 100 \text{ [\%]}, \quad (5.5)$$

kde: $\delta_m(\tau)$...relativní úbytek hmotnosti v čase [%]
 $m(\tau)$...hmotnost vzorku v čase [g]
 Δm ...rozdíl hmotnosti [g]

5.7 Použité statistické analýzy

Pro každý z experimentů byla použita pro statistické zpracování dat průzkumová analýza, pomocí které byly odhaleny zvláštnosti dat, jako lokální koncentrace dat, přítomnost podezřelých hodnot, anomálie a odchylky rozdělení výběru od typického rozdělení, zpravidla normálního – Gaussova rozdělení [63]. Z uvedeného důvodu byl každý soubor dat stanovený experimentem ověřen, zda odpovídá normalitě daného souboru. Normalita souboru byla ověřována na základě Shapiro-Wilkova testu normality na hladině významnosti alfa (0,05).

V případě, kdy soubor dat neodpovídal normálnímu rozdělení, byla provedena transformace celého souboru pomocí Box-Coxovy transformace. Pro optimální odhad exponentu λ byl použit selekční graf dle Hinese a Hinesové.

Kde podle umístění experimentálních bodů v okolí nomogramu teoretických křivek selekčního grafu bylo možné vizuálně odhadnout velikost λ a posoudit tak kvalitu transformace v různých vzdálenostech od mediánu [63]. Pro popisnou statistiku byly použity momentové míry polohy a rozptýlení (variability). Charakteristiky polohy byly vyjádřeny aritmetickým průměrem (5.5) a rozptyl byl vyjádřen variačním koeficientem, vyjádřeným poměrem směrodatné odchylky a aritmetického průměru (5.6 a 5.7), dle ČSN 49 0123.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (5.5)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5.6)$$

$$V = \frac{S}{\bar{x}} \cdot 100 \quad [\%], \quad (5.7)$$

kde: x_i ...hodnota zkoumané vlastnosti, zjištěné na i -té jednotce výběru, sestávajícího se z n jednotek

5.7.1 Statistická analýza pro zpracování dat z dendrochronologického datování

Koeficient souběžnosti

Vyjadřuje procento shodnosti letokruhových křivek v místech jejich překrytí (například standardní chronologie a průměrné sumární křivky). Oběma křivkám jsou přiřazovány hodnoty po roce. Hodnoty jsou (-1 klesá, +1 roste, 0 stagnuje). Následuje porovnávání hodnot překrývajících se sekvencí křivek. Počet let se stejnou hodnotou k počtu let překrývajících se sekvence udává souběžnost (0 - 100%). Použití koeficientu shody nevyžaduje odstranění trendu, protože hodnotí pouze vztahy mezi dvěma po sobě následujícími letokruhy [64]. Obecně by neměla být souběžnost nižší než 55 %. Tento test poskytuje rychlou informaci o tom, zda má hodnota souběžnosti (v intervalu překrytí křivek) statistický význam. Souběžnost je vyjádřena vzorcem 5.8 [63].

$$a = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} |a_{ix} + a_{iy}| \quad a_{ix}, a_{iy} - (-1, +1, 0) \quad (5.8)$$

kde: n ...počet let (program PAST)

Studentův T-test

T-test porovnává letokruhové křivky (vzorek a standard) jako dvě datové řady. Míra podobnosti je spočítána pomocí korelačního koeficientu a její statistická významnost hodnocena pomocí t-testu. Data jsou před statistickým výpočtem převedena neboli transformována. Transformace je třeba pro splnění statistických podmínek vyžadujících použití t-testů (program PAST).

Metody transformace jsou označovány termínem *detrending* [45]. Transformace může být provedena dvěma způsoby, a to transformací dle Baillie-Pilchera a Hollsteina. Obě transformace se liší v účinku a v současnosti jsou běžně využívány a standardně zařazeny do moderního datovacího počítačového softwaru (program PAS) [45]. Hollsteinova transformace v podstatě zcela ruší vliv všech trendů a ponechává pouze změny mezi dvěma po sobě následujícími roky, Baillie – Pilcherova transformace ponechává vliv krátkodobých výkyvů s délkou výkyvu do pěti let [64]. T-testy se tedy liší způsobem transformace dat, které jsou potřeba pro výpočet korelačního koeficientu. U transformovaných křivek jsou šířky letokruhů nahrazeny bezrozměrnými letokruhovými indexy [63].

Transformace dle Baillie&Pilcher [57]:

$$y_{bpi} = \ln \left(\frac{5_{yi}}{y_{i-2} + y_{i-1} + y_i + y_{i+1} + y_{i+2}} \right) \quad (5.9)$$

kde: y_i ...šířka letokruhů
i...letopočet

Transformace dle Hollsteina [56]:

$$y_{hi} = \ln \left(\frac{y_i}{y_i + 1} \right) \quad (\text{program PAST}) \quad (5.10)$$

K posouzení míry podobnosti je používán korelační koeficient (5.11) [45]:

$$C_{coef} = \frac{\sum_{i=x..y} (s_i - \bar{s})(r_i - \bar{r})}{\sqrt{\sum_{i=x..y} (s_i - \bar{s})^2 (r_i - \bar{r})^2}} \quad (5.11)$$

kde: x, y ...hranice překrytí křivek
 r_i, s_i ...hodnoty letokruhů po transformaci
 \bar{r}, \bar{s} ...průměrné hodnoty letokruhových řad (program PAST)

Konečná podoba t-testu (5.12) podle Stone [65]:

$$t = \frac{C_{coef} \sqrt{n-2}}{\sqrt{(1 - C_{coef}^2)}} \quad (5.12)$$

kde: n ...počet překrývajících se let

Hodnoty t-testu by měly dosahovat hodnot minimálně 5. Hodnoty souběžnosti a t-testů vyjadřují podobnost mezi křivkami v protínajících se částech [63]. Spolehlivost datování je závislá také na délce překrytí křivek. Čím delší je překrytí, tím lépe pro podobnost řad. Při délce překrytí 40 let by měl korelační koeficient dosahovat hodnoty 3,551. Při hodnotě t-testu nižší než 3,5 je pravděpodobnost pozitivní korelace křivek jen velmi malá [63].

6 Výsledky

6.1 Dendrochronologické datování konstrukčních prvků

Pro komplexní dendrochronologické datování bylo odebráno větší množství konstrukčních prvků z daných objektů. Po vzájemném srovnání naměřených letokruhových křivek a detrendování byla z dobře synchronizovaných křivek vytvořena jedna křivka tzv. sumární a ta byla porovnána se standardní chronologií pro jedli. Za předpokladu, že byly letokruhové řady spolehlivě synchronizovatelné s absolutně datovanou standardní letokruhovou chronologií, bylo výsledkem absolutní datování jednotlivých letokruhů zkoumaných dřevěných prvků. Pokud byl zjištěn podkorní letokruh, byla datace rokem skácení stromu použitého ke zhotovení konstrukčního prvku. Rok skácení stromu ovšem nemusel být totožný s rokem výstavby objektu. V takovém případě bylo nutné připočítat dobu potřebnou pro opracování případně i sušení dřeva. Determinace dřeva byla provedena pomocí běžných xylogomických metod [66]. Výsledky dendrochronologického datování jednotlivých prvků daných objektů jsou znázorněny graficky a naměřené hodnoty jsou uvedeny v příslušných tabulkách, tab. 6.1 – 6.15.

6.1.1 Datace konstrukčních dřevěných prvků zámku Rychvald

Dendrochronologicky vyhodnoceny byly vzorky odebrané z druhotně použitých stropních trámů patra hlavní budovy zámku v Rychvaldě (okr. Karviná). Celkem tak byly vyhodnoceny vzorky odebrané z 3 konstrukčních prvků (tab. 6.1). U těchto vzorků byly změřeny letokruhové sekvence a vytvořeny křivky průměrné, které byly datovány podle standardní chronologie jedle pro Moravu (je-mo05 - 1056 - 1996), [67].

Tab. 6.1: Přehled parametrů vzorků z dřevěných konstrukčních prvků zámku Rychvald [67]

| Číslo vzorku | dřevina | konstrukce | popis prvku | WK | Počet letok/běl | Datum skácení |
|--------------|---------|------------------------|---|----|-----------------|----------------|
| S1250 | jedle | strop, S křídlo, 2. NP | strop, druhotně použito, žlábková profilace | A | 69 | 1622/23 |
| S1252 | jedle | strop, S křídlo, 2. NP | strop, druhotně použito, žlábková profilace | A | 74 | 1622/23 |
| S1255 | jedle | strop, S křídlo, 2. NP | strop, druhotně použito, žlábková profilace | A | 67 | 1622/23 |

*WK - podkorní letokruh (Kambium), vzorek lze datovat přesně rokem utěti stromu. Doba kácení použitého stromu je uvedena ve sloupci „datum skácení“ ve tvaru 1622/23- strom kácen na přelomu let 1622 – 1623.

Rok kácení stromů – datování podkorních letokruhů

Podkorní letokruhy datující rok kácení použitých stromů se dochovaly na všech datovaných trámech. Všechny prvky měly podkorní letokruh již zcela vytvořený, což znamená, že tyto stromy byly káceny v době vegetačního klidu (cca říjen - duben). Detailní přehled výsledků je uveden v tabulce 6.1, [67].

Relativní datování

Letokruhové křivky všech jedlových druhotně použitých stropních trámů se žlábkovou profilací bylo možné synchronizovat do 74 let dlouhé průměrné chronologie označené *S12rychvald-zamekAB1* (obr. 6.1a). Parametry sestavené průměrné chronologie jsou uvedeny v tab. 6.2, [67].

Tab. 6.2: Parametry sestavených průměrných chronologií [67]

| Průměrné chronologie | Číslo vzorků v chronologii | dřevina | Počet let./běl | Datum skácení |
|-----------------------------|----------------------------|---------|----------------|---------------|
| S12rychvald-zamekAB1 | S1250+52+55 | jedle | 74 | 1622 |

Absolutní datování

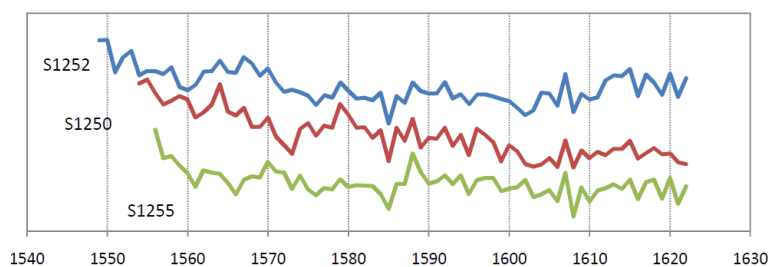
Porovnáním průměrné chronologie jedlových prvků se standardní chronologií jedle pro Moravu vedlo k nalezení spolehlivé synchronní pozice (tab. 6.3, obr. 6.1b).

Tab. 6.3: Hodnoty t-testu korelačního koeficientu po standardizaci letokruhových řad [67]

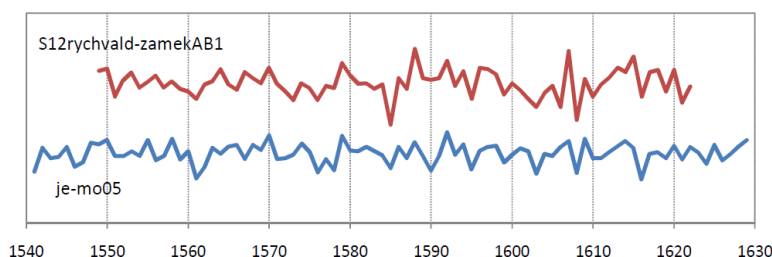
| je-mo05 (1056 - 1996) | A | B | C | D | E |
|-----------------------|--------|--------|----------|----|-----------------|
| S12rychvald-zamekAB1 | 7,24** | 8,13** | 73,6 %** | 74 | 0,64 (t=7,07**) |

kde: A - hodnoty t-testu korelačního koeficientu na základě pětiletého klouzavého průměru, B - hodnoty t-testu podle metody popisované Hollsteinem (1980), C - hodnota koeficientu souběžnosti (GI), D - délka překrytí srovnávaných letokruhových řad, E - hodnoty korelačního koeficientu a odpovídajícího t-testu (t) získané v programu Cofecha. Hodnoty označené (*) jsou signifikantní na hladině významnosti 99,5 %, (**) signifikantní na hladině významnosti 99,95%.

Na obr. 6.1a a 6.1b jsou znázorněny letokruhové křivky druhotně použitých stropních trámů se žlábkovou profilací, které byly dle datace zhotoveny z jedlí pokácených v letech 1622/23, [67].



Obr. 6.1a: Letokruhové křivky jedlových trámů synchronizované do chronologie S12rychvald-zamekAB1 [67]



Obr. 6.1b: Porovnání průměrné letokruhové křivky jedlových trámů S12rychvald-zamekAB1 se standardní chronologií jedle pro Moravu (je-mo05), [67]

6.1.2 Datace konstrukčních dřevěných prvků domu v Palkovicích

Vzorky pro dendrochronologické datování v podobě příčných výřezů byly odebrány z krokve a obvodové zdi domu v Palkovicích čp. 691 (okr. Frýdek-Místek). Celkem byly vyhodnoceny vzorky odebrané z 2 konstrukčních prvků (tab. 6.4), [69].

Tab. 6.4: Přehled parametrů vzorků z dřevěných konstrukčních prvků domu čp. 691 [69]

| Číslo vzorku | dřevina | konstrukce | popis prvku | WK | Počet letok./běl | Datum skácení |
|--------------|---------|---------------------|--------------|----|------------------|---------------|
| S3014 | jedle | Palkovice – čp. 691 | obvodová zeď | N | 73 | 1773+ |
| S3015 | jedle | Palkovice – čp. 691 | krokev | A | 34 | 1775/76 |

*WK - podkorní letokruh (Kambium), vzorek lze datovat přesně rokem utěti stromu. Doba kácení použitého stromu je uvedena ve sloupci „datum skácení“ ve tvaru 1775/76- strom kácen na přelomu let 1775 - 1776, 1773+ - strom kácen někdy po roce 1773 (vzorek bez podkorního letokruhu).

Rok kácení stromů – datování podkorních letokruhů

Podkorní letokruh datující rok kácení použitého stromu se dochoval na jednom z datovaných trámů. Podkorní letokruh byl již zcela vytvořen (včetně pozdního dřeva), což znamená, že strom byl kácen v době vegetačního klidu (cca říjen – duben). V případě prvku bez podkorního letokruhu bylo možné určit pouze nejmladší rok, po kterém byl použitý strom pokácen. Detailní přehled výsledků je uveden v tabulce 6.4, [69].

Relativní datování

Letokruhové křivky dvou jedlových trámů bylo možné synchronizovat do jediné 75 let dlouhé průměrné chronologie označené *S30palkovice-cp_691AB* (obr. 6.2a). Parametry sestavené průměrné chronologie jsou uvedeny v tab. 6.5, [69].

Tab. 6.5: Parametry sestavené průměrné chronologie [69]

| Průměrné chronologie | Číslo vzorků v chronologii | dřevina | Počet let./běl | Datum skácení |
|-----------------------|----------------------------|---------|----------------|---------------|
| S30palkovice-cp_691AB | S3014+15 | jedle | 75 | 1775 |

Absolutní datování

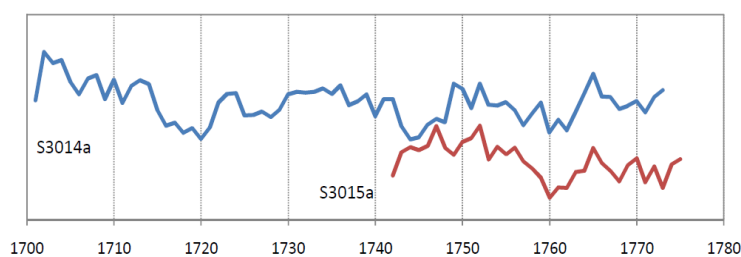
Porovnání sestavené chronologie se standardní chronologií jedle pro Moravu vedlo k nalezení spolehlivé synchronní pozice (tab. 6.6) datující poslední letokruh řady do roku 1775 (obr. 6.2b), [69].

Tab. 6.6: Hodnoty *t*-testu korelačního koeficientu po standardizaci letokruhových řad [69]

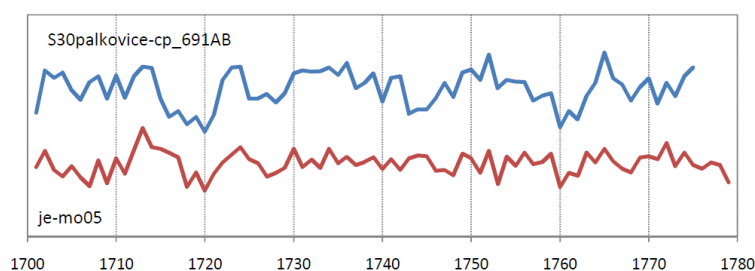
| je-mo05 (1056 - 1996) | A | B | C | D | E |
|-----------------------|--------|--------|----------|----|----------------|
| S30palkovice-cp_691AB | 4,89** | 7,14** | 76,7 %** | 75 | 0,52 (t=5,2**) |

kde: A - hodnoty *t*-testu korelačního koeficientu na základě pětiletého klouzavého průměru, B - hodnoty *t*-testu podle metody popisované Hollsteinem (1980), C - hodnota koeficientu souběžnosti (GI), D - délka překrytí srovnávaných letokruhových řad, E - hodnoty korelačního koeficientu a odpovídajícího *t*-testu (*t*) získané v programu Cofecha. Hodnoty označené (*) jsou signifikantní na hladině významnosti 99,5 %, (**) signifikantní na hladině významnosti 99,95%.

Z výsledků datování je zřejmé, že konstrukční prvky domu čp. 691 byly zhotoveny z jedlí kácených po roce 1773 a na přelomu let 1775 – 1776, obr. 6.2a a 6.2b, [69].



Obr. 6.2a: Letokruhové křivky jedlových prvků krovu synchronizované do chronologie S30palkovicecp_691AB [69]



Obr. 6.2b: Porovnání průměrné letokruhové křivky jedlových trámů S30palkovice-cp_691AB se standardní chronologií jedle pro Moravu (je-mo05), [69]

6.1.3 Datace konstrukčních prvků sýpky ve Velké Polomi

Vzorky pro dendrochronologické datování byly odebrány ze stropů a krovů dostupných částí sýpky. Ve většině případů byly odebrány pomocí Presslerova nebozezu. Pouze ze dvou stropních trámů zřícené části objektu byly odebrány příčné výřezy. Celkem tak byly vyhodnoceny vzorky odebrané ze 4 konstrukčních prvků (tab. 6.7), [71].

Tab. 6.7: Přehled parametrů vzorků z dřevěných konstrukčních prvků sýpky [71]

| Číslo vzorku | dře- vi- na | konstrukce | popis prvku | WK | Počet letok./běl | Datum skácení |
|----------------|-------------------|--|---|---------|------------------|----------------|
| R6851a2 | jedle | jižní část - strop patra v severní části | horní vaznice stojaté stolice podírající stropní trámy u západní stěny | A | 50 | 1801/02 |
| R6853 | jedle | jižní část - strop patra v severní části | prahová vaznice stojaté stolice podírající stropní trámy u východní stěny | N | 42 | 1774+ |
| R6859 | jedle | jižní křídlo - strop přízemí | 1. stropní trám od východu (s ozdob. profilací) | A (řez) | 88 | 1800/01 |
| R6860 | jedle | jižní křídlo - strop přízemí | 3. stropní trám od západu (s ozdob. profilací) | N (řez) | 34 | 1791+ |

*WK - podkorní letokruh (Kambium), vzorek lze datovat přesně rokem utěti stromu. Doba kácení použitého stromu je uvedena ve sloupci „datum skácení“ ve tvaru 1902/03- strom kácen na přelomu let 1902 – 1903, 1774+ - strom kácen někdy po roce 1774

Rok kácení stromů – datování podkorních letokruhů

Podkorní letokruhy datující rok kácení použitých stromů se dochovaly na většině z datovaných prvků. Všechny prvky měly podkorní letokruh již zcela vytvořen (včetně pozdního dřeva), což znamená, že tyto stromy byly káceny v době vegetačního klidu (cca říjen – duben). V případě trámů *R6853* a *R6860*, u kterých se podkorní letokruh nedochoval, bylo možné stanovit pouze nejmladší rok, po kterém byl použitý strom pokácen (terminus post quem). Detailní přehled výsledků je uveden v tabulce 6.7, [71].

Relativní datování

Letokruhové křivky jedlových stropních trámů ze severního křídla a vložených vaznic u stěn patra sýpky byly sumarizovány do 89 let dlouhé chronologie označené *R68velka_polom-sypkaAB1* (obr. 6.3a). Parametry sestavených průměrných chronologií jsou uvedeny v tab. 6.8, [71].

Tab. 6.8: Parametry sestavených průměrných chronologií [71]

| Průměrné chronologie | Číslo vzorků v chronologii | dřevina | Počet let./běl | Datum skácení |
|-------------------------|----------------------------|---------|----------------|---------------|
| R68velka_polom-sypkaAB1 | R6851a52+53+59+60 | jedle | 89 | 1801 |

Absolutní datování

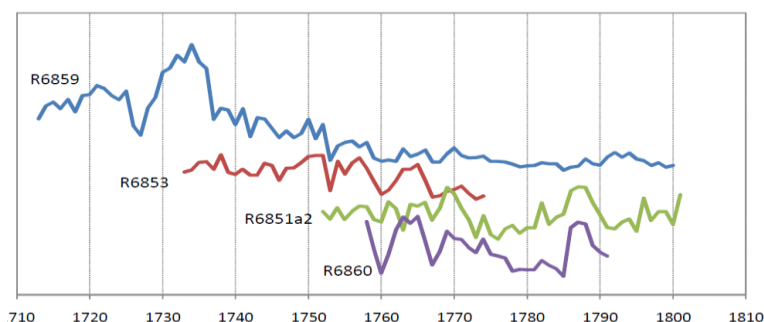
Porovnání průměrných chronologií se standardní chronologií příslušné dřeviny vedlo k nalezení spolehlivých synchronních pozic (tab. 6.9) datujících poslední letokruh řady AB1 do roku 1801 (obr. 6.3b), [71].

Tab. 6.9: Hodnoty t-testu korelačního koeficientu po standardizaci letokruhových řad [71]

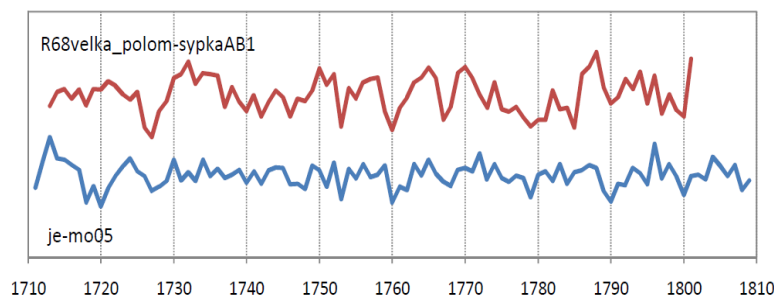
| je-mo05 (1056 - 1996) | A | B | C | D | E |
|-------------------------|--------|--------|---------|----|-----------------|
| R68velka_polom-sypkaAB1 | 4,76** | 6,04** | 71,3 %* | 89 | 0,47 (t=4,97**) |

kde: A - hodnoty t-testu korelačního koeficientu na základě pětiletého klouzavého průměru, B - hodnoty t-testu podle metody popisované Hollsteinem (1980), C - hodnota koeficientu souběžnosti (GI), D - délka překrytí srovnávaných letokruhových řad, E - hodnoty korelačního koeficientu a odpovídajícího t-testu (t) získané v programu Cofecha. Hodnoty označené (*) jsou signifikantní na hladině významnosti 99,5 %, (**) signifikantní na hladině významnosti 99,95%.

Stropní trámy jižního křídla a trámy podpírající stropní trámy patra jižní části sýpky byly podle výsledků dendrochronologického datování vyrobeny z jedlí pokácených v letech 1800/01 a 1801/02. Vaznice stojaté stolice (R6853) byla vyrobena z jedle pokácené po roce 1774 a stropnice s ozdobnou profilací (R6860) byla zhotovena z jedlového dřeva skáceného po roce 1791, obr. 6.3a a 6.3b, [71].



Obr.: 6.3a: Letokruhové křivky jedlových trámů synchronizované do chronologie R68velka_polomsypkaAB1[71]



Obr.: 6.3b: Porovnání průměrné letokruhové křivky jedlových trámů R68velka_polomsypkaAB1 se standardní chronologií jedle pro Moravu (je-mo05), [71]

6.1.4 Datace konstrukčních dřevěných prvků domu v Bernarticích

Vzorky pro dendrochronologické datování v podobě vývrtů i příčných výřezů byly odebrány z krovů stájí a stropů z východní části (dnešní penzion) středověkého svobodného dvora v Bernarticích čp. 57 (okr. Nový Jičín). Celkem byly vyhodnoceny vzorky odebrané z 8 konstrukčních prvků, přehled a popis prvků je uveden v tab. 6.10, [70].

Tab. 6.10: Přehled parametrů vzorků z dřevěných konstrukčních prvků domu čp. 57 [70]

Výsledky

| Číslo vzorku | dřevina | konstrukce | popis prvku | WK | Počet letok./běl | Datum skácení |
|--------------|---------|------------|--------------------|----|------------------|---------------|
| S0563a4 | jedle | stáje | průvlak | N | 42 | 1786+ |
| S0565a6 | jedle | stáje | stropnice, 3. od Z | N | 62 | 1786+ |
| S0571a2 | jedle | krov stáje | sloupek | N | 51 | 1808+ |
| S1189 | jedle | penzion | roubení podkroví | N | 46 | 1841+ |
| S1190 | jedle | penzion | strop penzionu | N | 132 | 1852+ |
| S1191 | jedle | penzion | stropnice | N | 135 | 1852+ |
| S1192 | jedle | krov stáje | sloupek | A | 90 | 1811 I |
| S1193 | jedle | krov stáje | roubení | A | 36 | 1810/11 |

WK - podkorní letokruh (Kambium), vzorek lze datovat přesně rokem utěti stromu. Doba kácení použitého stromu je uvedena ve sloupci „datum skácení“ ve tvaru 1810/11 - strom kácen na přelomu let 1810 - 1811, 1811 I - strom kácen v létě roku 1811; 1852+ - strom kácen někdy po roce 1852 (vzorek bez podkorního letokruhu)

Rok kácení stromů – datování podkorních letokruhů

Podkorní letokruhy datující rok kácení použitých stromů se dochovaly na dvou trámech krovu stáje. Jeden trám měl podkorní letokruh úplný (strom byl kácen v době vegetačního klidu), na druhém trámu byl letokruh pouze částečný (dřevo káceno v průběhu vegetační sezóny). U trámů bez podkorních letokruhů bylo možné určit pouze nejmladší rok, po kterém byly použité stromy pokáceny. Detailní přehled výsledků je uveden v tabulce 6.10, [70].

Relativní datování

Všechny letokruhové křivky bylo možné synchronizovat do jediné, 132 let dlouhé průměrné chronologie označené *S05a11bernartice-cp_57AB* (obr. 6.4a). Parametry sestavené průměrné chronologie jsou uvedeny v tab. 6.11, [70].

Tab. 6.11: Parametry sestavené průměrné chronologie [70]

| Průměrné chronologie | Číslo vzorků v chronologii | dřevina | Počet let./běl | Datum skácení |
|---------------------------------|--|---------|----------------|---------------|
| S05a11bernartice-cp_57AB | S0563a64+65a66+71a72 + 89+90+91+92+93 | jedle | 118 | 1849 |

Absolutní datování

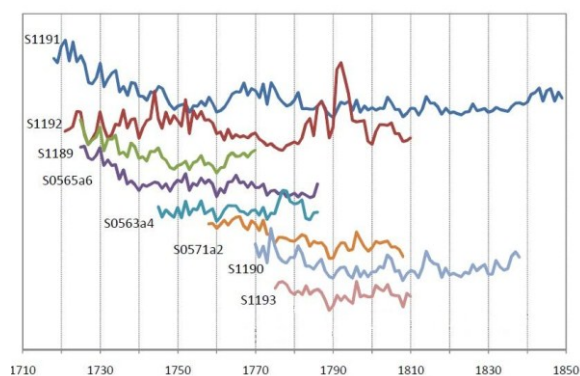
Porovnání sestavené chronologie se standardní chronologií jedle pro Moravu vedlo k nalezení spolehlivé synchronní pozice (tab. 6.12) datující poslední letokruh řady do roku 1849 (obr.6.4b), [70].

Tab. 6.12: Hodnoty *t*-testu korelačního koeficientu po standardizaci letokruhových řad [70]

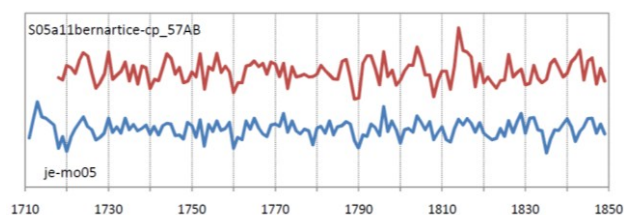
| je-mo05 (1056 - 1996) | A | B | C | D | E |
|--------------------------|--------|--------|---------|-----|-----------------|
| S05a11bernartice-cp_57AB | 8,38** | 9,89** | 76,1%** | 132 | 0,58 (t=8,12**) |

kde: A - hodnoty *t*-testu korelačního koeficientu na základě pětiletého klouzavého průměru, B - hodnoty *t*-testu podle metody popisované Hollsteinem (1980), C - hodnota koeficientu souběžnosti (GI), D - délka překrytí srovnávaných letokruhových řad, E - hodnoty korelačního koeficientu a odpovídajícího *t*-testu (*t*) získané v programu Cofecha. Hodnoty označené (*) jsou signifikantní na hladině významnosti 99,5 %, (**) signifikantní na hladině významnosti 99,95%.

Trámy krovu stájí byly zhotoveny z jedlí pokácených v letech 1810 – 1811. Stropní trámy stájí byly vyrobeny z jedlí pokácených někdy po roce 1786. Konstrukční prvky penziónu byly zhotoveny z jedlí kácených po roce 1841 a 1852, [70].



Obr. 6.4a: Letokruhové křivky jedlových prvků krovu synchronizované do chronologie S09a11bernarticecp_57AB [70]



Obr.6.4b: Porovnání průměrné letokruhové křivky jedlových trámů se standardní chronologií jedle pro Moravu (je-mo05, [70])

6.1.5 Datace konstrukčních dřevěných prvků hospodářské budovy zámku Rychvald

Vzorky pro dendrochronologické datování v podobě příčných výřezů byly odebrány ze stropních trámů hospodářské budovy zámku Rychvald. Celkem byly vyhodnoceny vzorky odebrané z 3 konstrukčních prvků (tab. 6.13), [68].

Tab. 6.13: Přehled parametrů vzorků z dřevěných konstrukčních prvků zámku Rychvald [68]

| Číslo vzorku | dřevina | konstrukce | popis prvku | WK | Počet letok./běl | Datum skácení |
|--------------|---------|-------------------------------------|------------------------------|----|------------------|---------------|
| S3039 | jedle | Rychvald – zámek-hospodářská budova | stropnice hospodářské budovy | N | 83 | 1842+ |
| S3040 | jedle | Rychvald – zámek-hospodářská budova | stropnice hospodářské budovy | N | 74 +1 | 1852+ |
| S3041 | jedle | Rychvald – zámek-hospodářská budova | stropnice hospodářské budovy | N | 98 +1 | 1853+ |

*WK - podkorní letokruh (Kambium), vzorek lze datovat přesně rokem utětí stromu. Doba kácení použitého stromu je uvedena ve sloupci „datum skácení“ ve tvaru 1842+ - strom kácen někdy po roce 1842 (vzorek bez podkorního letokruhu).

Rok kácení stromů – datování podkorních letokruhů

Podkorní letokruh datující rok kácení použitého stromu se na žádném z prvků nedochoval. U trámů bylo možné určit pouze nejmladší rok, po kterém byly použité stromy pokáceny. Detailní přehled výsledků je uveden v tab. 6.13, [68].

Relativní datování

Letokruhové křivky bylo možné synchronizovat do jediné 98 let dlouhé průměrné chronologie označené *S30rychvald-zamekAB3* (obr. 6.5a). V tab. 6.14 jsou uvedeny parametry sestavené průměrné chronologie, [68].

Tab. 6.14: Parametry sestavené průměrné chronologie [68]

| Průměrné chronologie | Číslo vzorků v chronologii | dřevina | Počet let./běl | Datum skácení |
|-----------------------------|----------------------------|---------|----------------|---------------|
| S30rychvald-zamekAB3 | S3039+40+41 | jedle | 98 | 1852 |

Absolutní datování

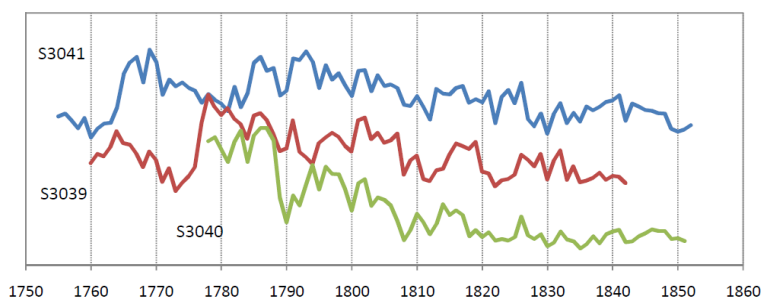
Porovnání sestavené chronologie se standardní chronologií jedle pro Moravu vedlo k nalezení spolehlivé synchronní pozice (tab. 6.15) datující poslední letokruh řady do roku 1852 (obr. 6.5b), [68].

Tab. 6.15: Hodnoty *t*-testu korelačního koeficientu po standardizaci letokruhových řad [68]

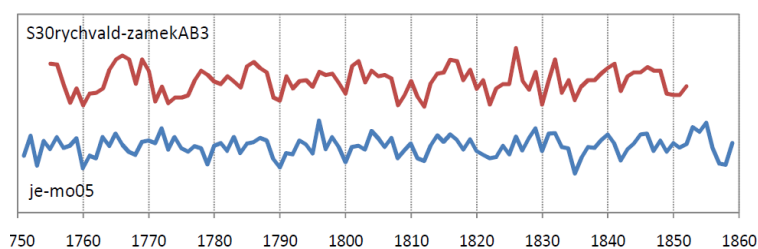
| je-mo05 (1056 - 1996) | A | B | C | D | E |
|-----------------------------|--------|--------|----------|----|-----------------|
| S30rychvald-zamekAB3 | 6,84** | 8,96** | 75,5 %** | 98 | 0,61 (t=7,54**) |

kde: A - hodnoty *t*-testu korelačního koeficientu na základě pětiletého klouzavého průměru, B - hodnoty *t*-testu podle metody popisované Hollsteinem (1980), C - hodnota koeficientu souběžnosti (GI), D - délka překrytí srovnávaných letokruhových řad, E - hodnoty korelačního koeficientu a odpovídajícího *t*-testu (*t*) získané v programu Cofecha. Hodnoty označené (*) jsou signifikantní na hladině významnosti 99,5 %, (**) signifikantní na hladině významnosti 99,95%.

Na základě dendrochronologického datování je možné konstatovat, že stropní trámy byly zhotoveny z jedlí pokácených někdy po roce 1853, obr. 6.5a, 6.5b.



Obr. 6.5a: Letokruhové křivky jedlových prvků krovu synchronizované do chronologie *S30rychvald-zamekAB3* [68]



Obr. 6.5b: Porovnání průměrné letokruhové křivky jedlových trámů se standardní chronologií jedle pro Moravu (je-mo05), [68]

Tabulka 6.16 je přehledem všech datovaných prvků dřevěných konstrukcí z odebraných objektů rozdělených do skupin A-E. V tabulce jsou zaznamenána čísla prvků řazených do průměrné chronologie daného objektu a skupiny, dále typ konstrukce a výsledné datování, [71].

Tab. 6.16: Přehled odebraných a datovaných vzorků skupiny A-E

| Vzorek | Průměrná chronologie | Číslo vzorku | konstrukce | Datování |
|----------|--------------------------|--------------|--------------------------------|----------|
| A | S12rychvald-zamekAB1 | S1250 | stropnice - žlábková profilace | 1622/23 |
| | | S1252 | stropnice - žlábková profilace | 1622/23 |
| | | S1255 | stropnice - žlábková profilace | 1622/23 |
| B | S30palkovice-cp_691AB | S3014 | obvodová zeď | 1773+ |
| | | S3015 | krokev | 1775/76 |
| C | R68velka_polom-sypkaAB1 | R6851a2 | horní vaznice | 1801/02 |
| | | R6853 | prahová vaznice | 1774+ |
| | | R6859 | stropnice - profilace | 1800/01 |
| | | R6860 | stropnice - profilace | 1791+ |
| D | S05a11bernartice-cp_57AB | S0563a4 | průvlak | 1786+ |
| | | S0565a6 | stropnice, 3. od Z | 1786+ |
| | | S0571a2 | sloupek | 1808+ |
| | | S1189 | roubení podkroví | 1841+ |
| | | S1190 | strop penzionu | 1852+ |
| | | S1191 | strop penzionu | 1852+ |
| | | S1192 | sloupek | 1811 1 |
| | | S1193 | roubení | 1810/11 |
| E | S30rychvald-zamekAB3 | S3039 | stropnice hospodářské budovy | 1842+ |
| | | S3040 | stropnice hospodářské budovy | 1852+ |
| | | S3041 | stropnice hospodářské budovy | 1853+ |

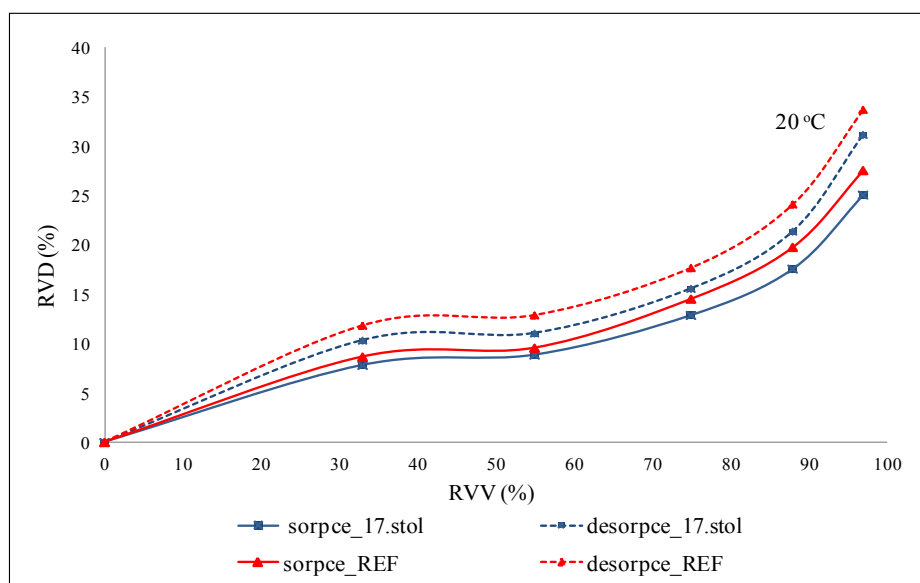
6.2 Porovnání hygroscopického chování dřeva historicky starého se dřevem referenčním

Pro zjištění hygroscopického chování dřeva ze 17. stol. byly použity vzorky druhotně použitých jedlových stropních trámů (S1250, S1252 a S1255, tab. 6.16 A) pokácených na přelomu let 1622/23. V tab. 6.17 jsou uvedeny střední hodnoty rovnovážné vlhkosti dřeva starého a referenčního spolu s hodnotami hystereze sorpce pro izotermy o konstantní teplotě 20 °C. Na obrázku 6.6a je grafické znázornění sorpčních izoterem s vyznačeným intervalem spolehlivosti. V příloze 11.1 jsou dále uvedeny hodnoty rovnovážné vlhkosti všech porovnávaných skupin dřev s vybranými statistickými charakteristikami.

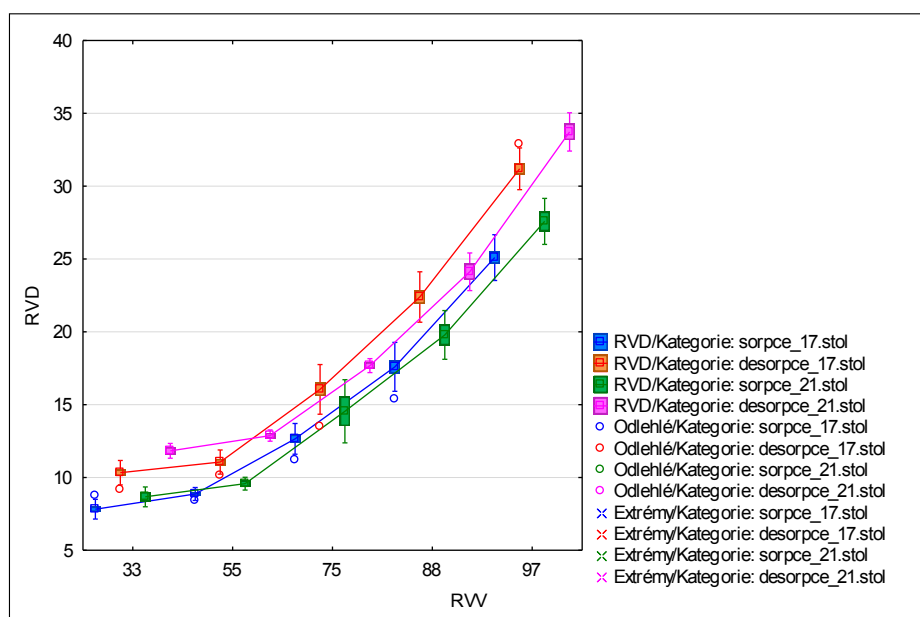
Tab. 6.17: Průměrné hodnoty rovnovážných obsahů vlhkosti dřeva starého a referenčního s uvedením hystereze sorpce pro izotermy 20 °C

| Sůl | ϕ [%] | Staré dřevo (17. stol.) | | | Referenční dřevo (21. stol.) | | |
|--|---------------|-------------------------|----------------------|----------------|------------------------------|----------------------|----------------|
| | | RVD _a [%] | RVD _d [%] | C _H | RVD _a [%] | RVD _d [%] | C _H |
| MgCl ₂ | 33 | 7,82 | 10,33 | 0,76 | 8,67 | 11,83 | 0,73 |
| Na ₂ Cr ₂ O ₇ | 55 | 8,87 | 11,06 | 0,80 | 9,57 | 12,88 | 0,74 |
| NaCl | 75 | 12,89 | 15,58 | 0,83 | 14,54 | 17,68 | 0,82 |
| KCl | 88 | 17,59 | 21,39 | 0,82 | 19,79 | 24,13 | 0,82 |
| K ₂ SO ₄ | 97 | 25,10 | 31,19 | 0,81 | 27,58 | 33,73 | 0,81 |

kde: ϕ (RVV) – relativní vlhkost vzduchu, RVD_a – střední hodnota rovnovážné vlhkosti dřeva při sorpci, RVD_d – střední hodnota rovnovážné vlhkosti dřeva při desorpci, C_H – koeficient hystereze sorpce.



Obr. 6.6: Sorpční izoterma dřeva ze 17. stol. ve srovnání s izotermou referenčního dřeva



Obr. 6.6a: Sorpční izoterma s vyznačeným intervalem spolehlivosti průměrné hodnoty ve věkových kategoriích 17.stol a 21.stol.

Sorpční izotermy historického dřeva a dřeva referenčního vykazují rozdíl při srovnání průměrných hodnot RVD (rovnovážné vlhkosti dřeva) v jednotlivých vlhkostních kategoriích RVV (relativních vlhkostech vzduchu). Při srovnatelném rozdělení výběrového souboru v rámci jedné věkové kategorie a přijatelné variabilitě a spolehlivosti sledované veličiny RVD by takový výsledek bylo možno charakterizovat jako velmi významný.

Avšak s ohledem na rozložení četností RVD v rámci jedné RVV kategorie je efekt sorpce a desorpce minoritním v porovnání s celkovou variabilitou RVD způsobenou ostatními parametry, které nebyly součástí pozorování. Do těchto efektů, které zásadním způsobem ovlivňují výsledné hodnoty RVD, lze zařadit vliv biotických škůdců, růstové vady a především nehomogenitu geometrie zejména s ohledem na odklon vláken. Srovnáme-li průběh sorpčních izoterm spolu s charakteristikami variability v následujících krabicových grafech, můžeme pouze konstatovat, že z naměřených dat lze pozorovat vzájemnou podobnost mezi průběhem sorpční a desorpční izotermy. Z obr. 6.6a je zřejmý nejen významný rozsah intervalu spolehlivosti v rámci jedné skupiny RVV, ale i mezi jednotlivými skupinami RVV. S ohledem na konfideční intervaly se ztrácí nejen rozdíl mezi věkovými kategoriemi, obr. 6.6a (konfideční intervaly se v rámci jedné skupiny RVV překrývají mezi sorpční a desorpční izotermou), ale ztrácí se i charakteristický esovitý průběh izotermy, který lze s ohledem na šířku konfidečních intervalů označit přinejmenším za nezřetelnou.

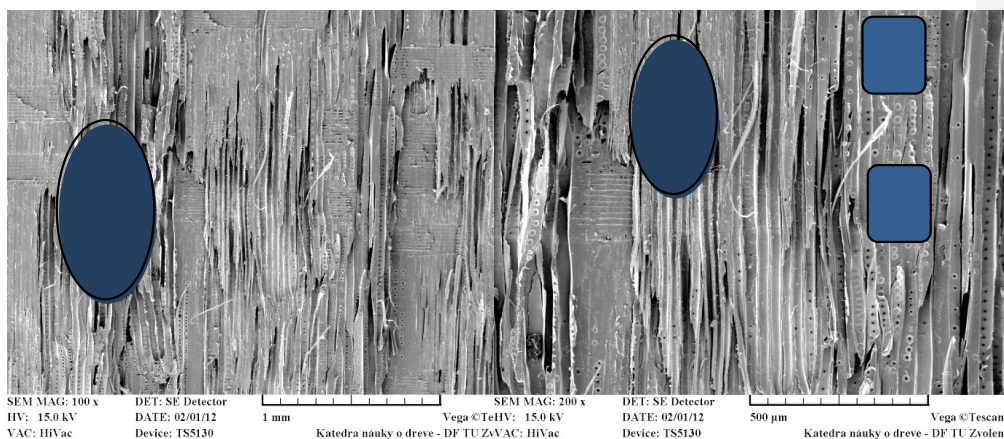
Dosažené výsledky zřetelně demonstrují nutnost zohlednění vysoké variability vlastností dřeva, které mohou mít vzájemný synergický účinek zejména při hodnocení tak integrální vlastnosti dřeva, jakou je hygroskopicitu. Pro hlubší analýzu tohoto problému lze doporučit zejména rozšíření počtu měřených vzorků, navýšení počtu vlhkostních kategorií RVV, zajištění všech požadavků definovaných normou, vyloučení biotických a abiotických vlivů zvyšujících heterogenitu sledované veličiny. S ohledem na nespojitost hysterezní křivky v mezním bodě při přechodu mezi prostředím exikátoru a klimatizační komorou lze doporučit pro další experimentální práci rovněž stanovení mezní (maximální) rovnovážné vlhkosti dřeva.

6.3 Mikroskopická analýza dřeva

6.3.1 Vzorek A

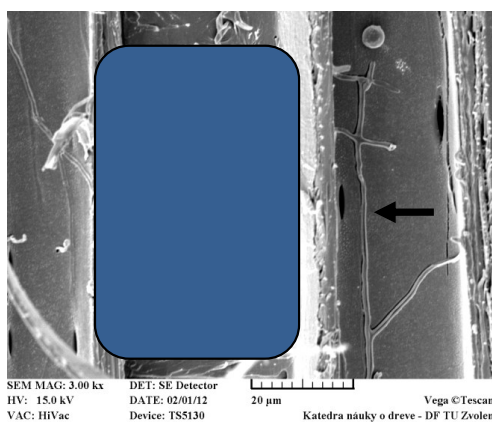
Poloha A1

Štěpná plocha vykazuje znaky ostrých jehlicovitých i tupých fraktur tracheid (obr. 6.7 – A7 a 6.8 – A8). Na plochách dřevných paprsků se objevují trhliny mezi jednotlivými parenchymatickými buňkami (obr. 6.9 – A9). Některé plochy křížového pole jsou částečně poškozené, pravděpodobně degradované činností dřevokazných hub (obr. 6.8 – A8 a 6.10 – A10). Komorovité dutiny dvojteček jsou na snímcích s bradavičnatými výčnělky, což je typický znak pro jedlové dřevo (obr. 6.11 – A11). V lumenech tracheid se objevoval i bradavičnatý povrch (obr. 6.10 – A10). Na místech, kde zůstal při štípání plochy přítomen torus, je možné pozorovat uvolňování torusu od marga (obr. 6.12 – A12). Na některých místech plochy se vyskytovala poměrně hustá síť hyf (obr. 6.13 – A13, 6.9 – A9). Tloušťka hyf byla cca 0,5 μm (obr. 6.14– A14).

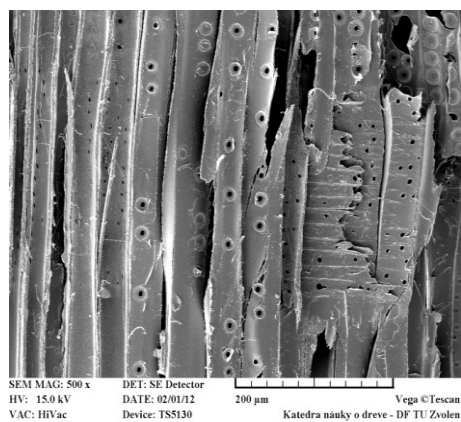


Obr. 6.7 – A7

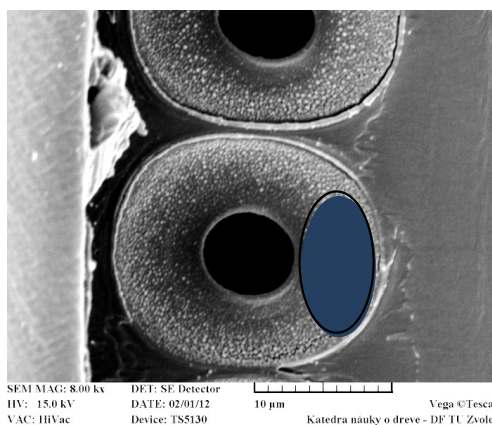
Obr. 6.8 – A8



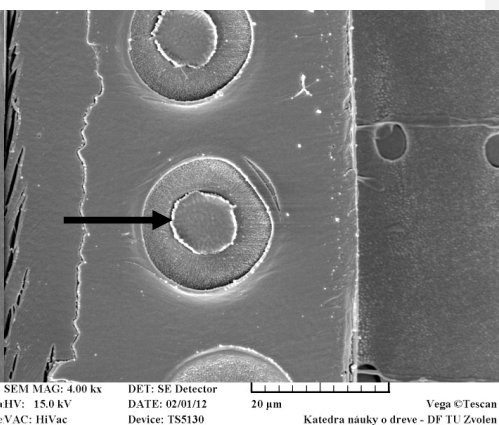
Obr.6.9 - A9



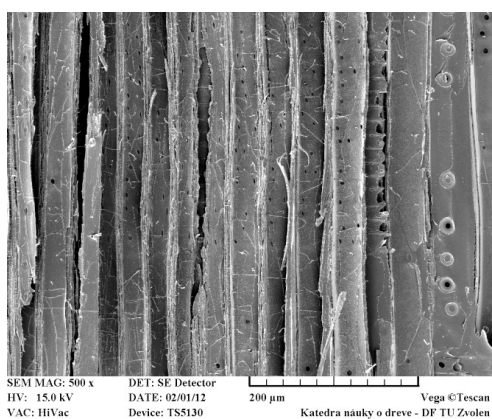
Obr. 6.10 – A10



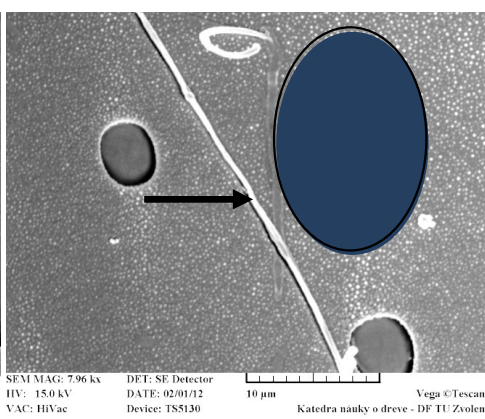
Obr. 6.11 – A11



Obr. 6.12 – A12



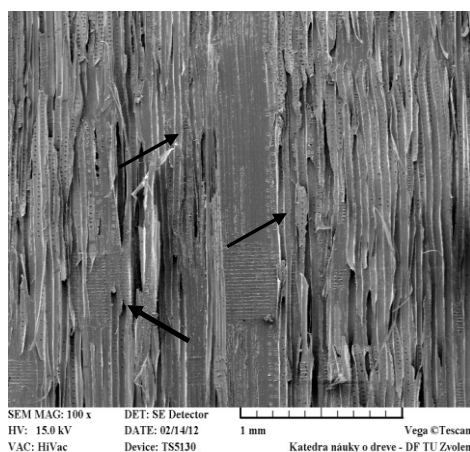
Obr. 6.13 – A13



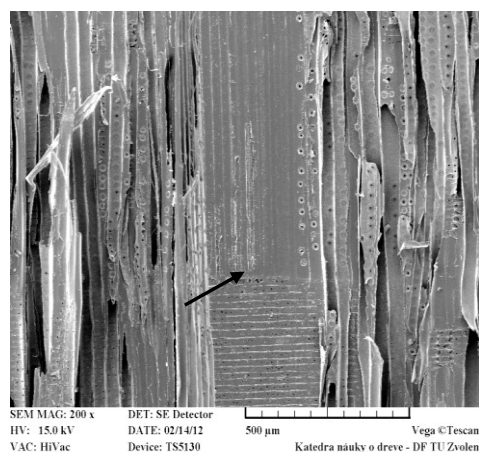
Obr. 6.14 – A14

Poloha A2

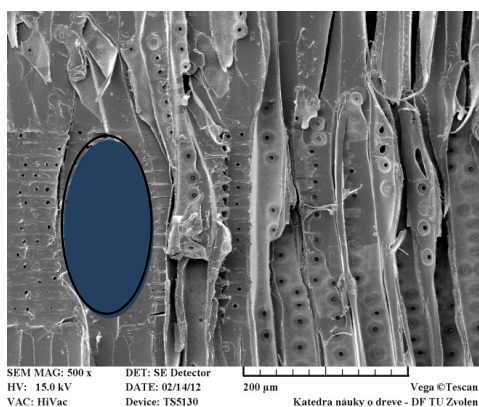
Fraktury na tracheidách vykazují jehlicovitý i tupý tvar podobně jako v poloze 1 (obr. 6.15 – A15). Hyfy však už v této ploše nejsou patrné. Plocha dřevových paprsků ještě vykazuje drobné stopy poškození, poškozené ztenčeniny křížového pole jsou patrné na obr. 6.16 – A16. Vazba mezi parenchymatickými buňkami dřevového paprsku je částečně poškozená (obr. 6.17 – A17). I v této poloze se objevuje bradavičnatý povrch a to ve větším počtu tracheid (obr. 6.18 – A18). Otvor dvojtečky je tvořený typickým bradavičnatým povrchem (obr. 6.19 – A19), torusy na dvojtečkách jsou často uvolněné od marga (obr. 6.20 – A20), což není možné považovat za typický znak. Může to souviset s enzymatickou činností hub nebo jsou to bakterie, které uvolňují spojení marga s torusem.



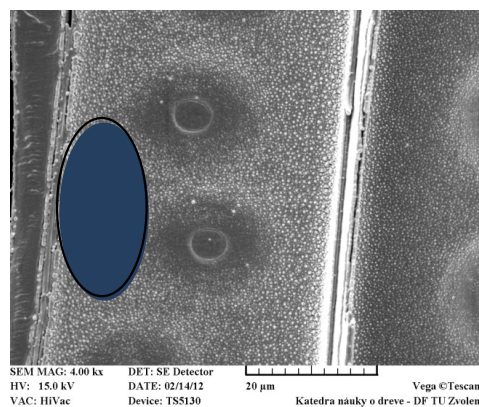
Obr. 6.15 – A15



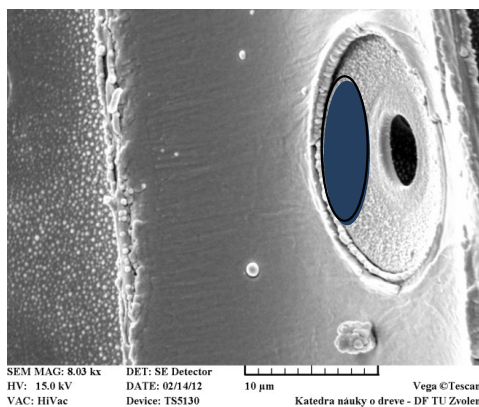
Obr. 6.16 – A16



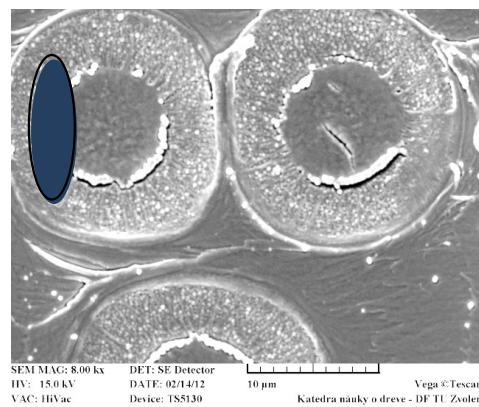
Obr. 6.17 – A17



Obr. 6.18 – A18



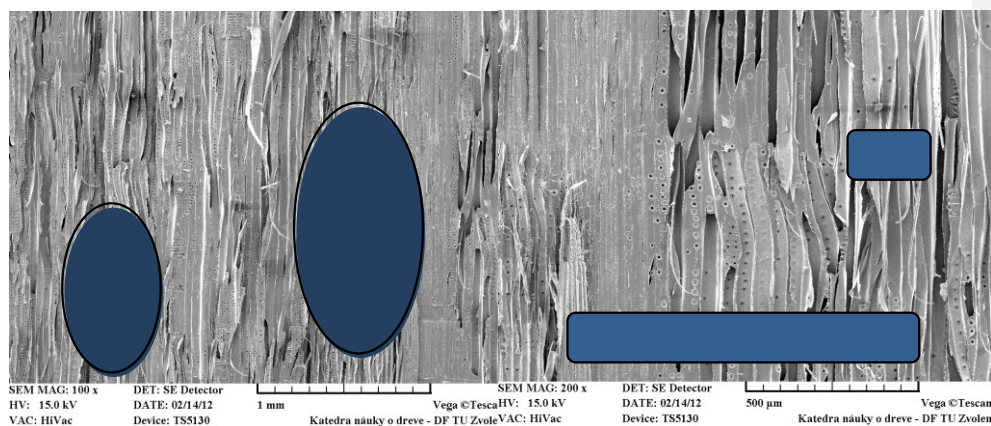
Obr. 6.19 – A19



Obr. 6.20 – A20

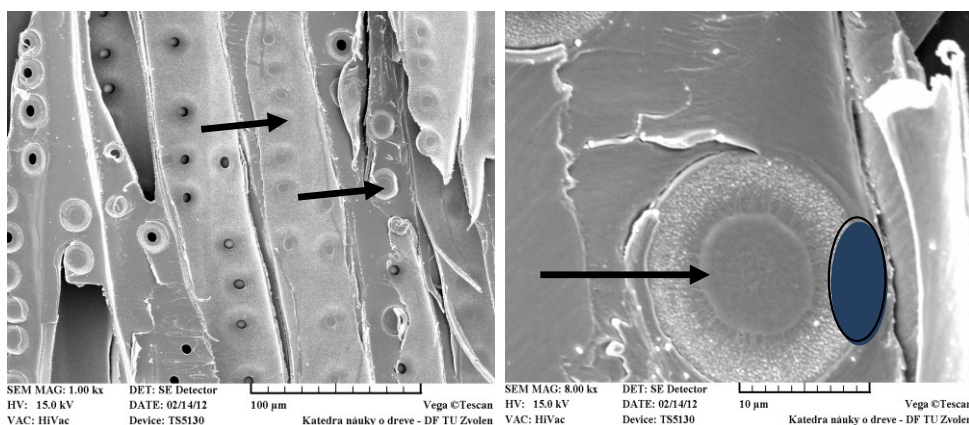
Poloha A3

Ostré tupé fraktury tracheid na snímaných plochách, obr. 6.21 – A21. Taxodiodní ztenčeniny křížového pole nejsou poškozené (obr. 6.22 – A22). Ani přítomnost hyf nebyla pozorována na snímané ploše. Dvojtečky často aspirované, uzavřené (obr. 6.23 – A23). Torus není natrhnutý na margu jako torusy obvodové a střední polohy vzorku (obr. 6.24 – A24). Na snímku je dále patrný bradavičnatý povrch dvojteček (obr. 6.24).



Obr. 6.21 – A21

Obr. 6.22 – A22

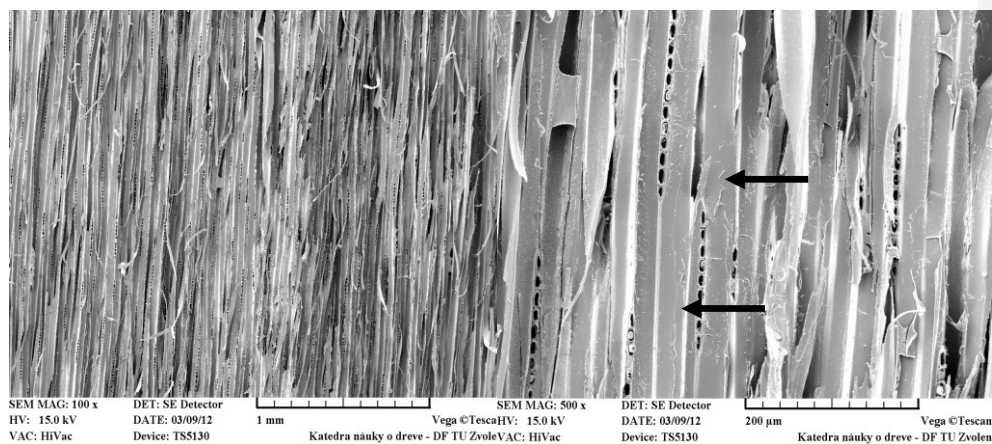


Obr. 6.23 – A23

Obr. 6.24 - A24

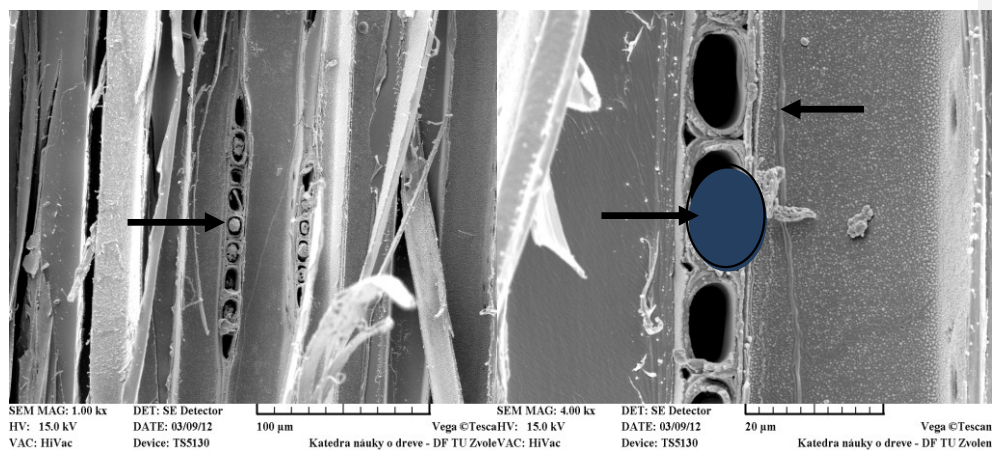
Tangenciální plocha, poloha A2

Na tangenciálních plochách jsou fraktury tracheid vláknité v letním dřevě, bez fraktur v jarním dřevě (obr. 6.25 – A25). Štípání (dělení vláken) probíhá nejčastěji ve střední lamelle až primární stěně (obr. 6.26 – A26). Dřeňové paprsky jsou lámány a vytváří tupou frakturu parenchymatických buněk. Přítomnost jádrových látek a krystalů v parenchymatických buňkách paprsku jsou patrné na obr. 6.27 – A27. Rovněž je pozorována přítomnost hyf v lumenech vláken (obr. 6.28 – A28).



Obr. 6.25 – A25

Obr. 6.26 – A26



Obr. 6.27 – A27

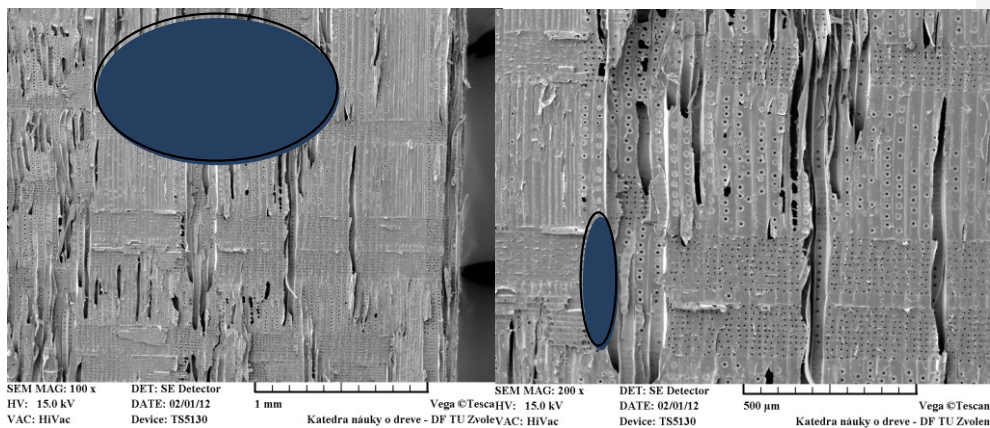
Obr. 6.28 – A28

6.3.2 Vzorek B

Poloha B1

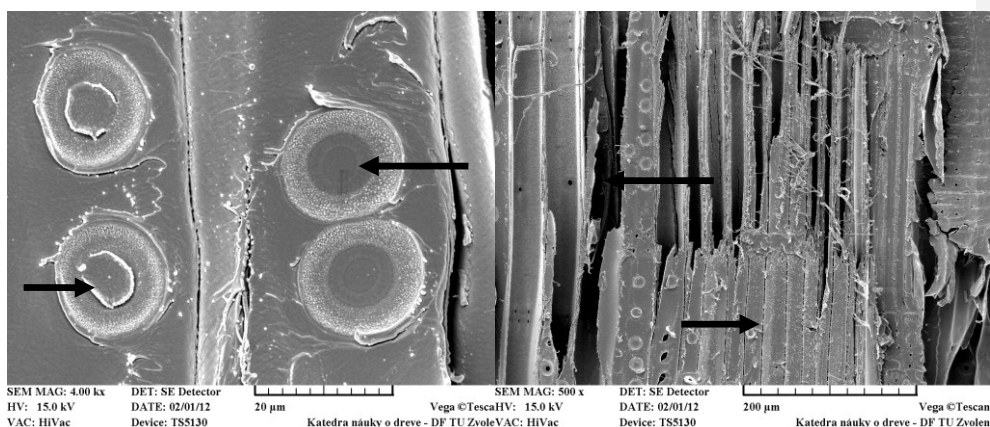
Plocha s tupými frakturami tracheid (obr. 6.29 – B29). Uvolnění vazeb ve střední lamelle i trhliny v buněčných stěnách tracheid (obr. 6.32 – B32). Některé stěny tracheid jsou silně narušené (obr. 6.30 – B30). Dvojtečky jsou patrné s typicky bradavičnatou strukturou, mnohé jsou aspirované, uzavřené, na některých dvojtečkách se torus

odtrhává od marga (obr. 6.31 – B31). Výrazný bradavičnatý povrch dvojteček. Hyfy nebyly na snímané ploše pozorované.



Obr. 6.29 – B29

Obr. 6.30 – B30

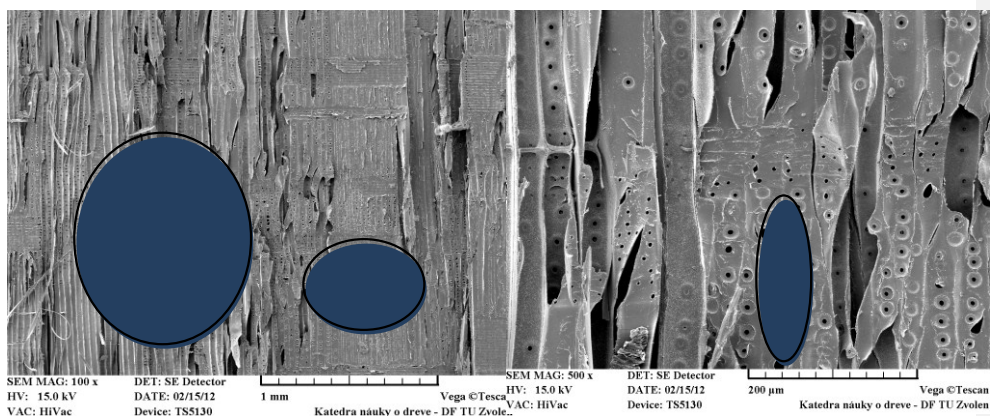


Obr. 6.31 – B31

Obr. 6.32 – B32

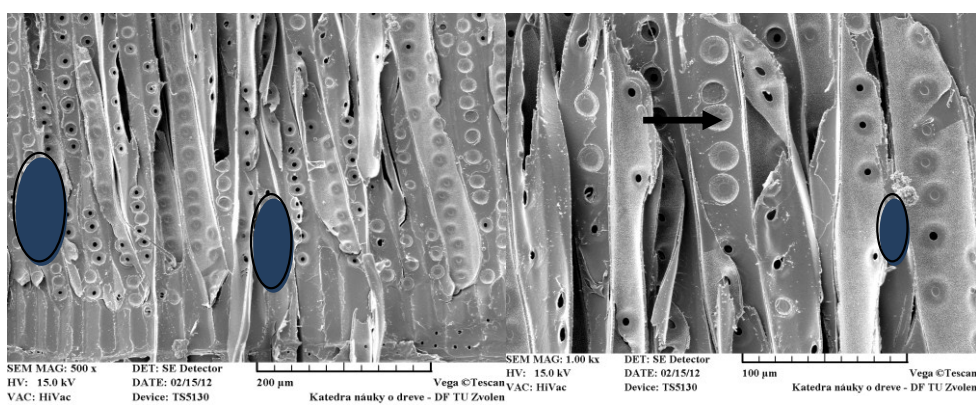
Poloha B2

Fraktury tracheid na snímané ploše jsou tupé až mírně jehlicovité (obr. 6.33 – B33). Na některých místech se objevuje poškození stěny tracheid (obr. 6.34 – B34, 6.35 – B35). Dvojtečky i aspirované s výrazným vykresleným margem (obr. 6.37 – B37). Mnohé lumeny tracheid jsou vyplněny bradavičnatou strukturou (obr. 6.37 – B37, 6.38 – B38).



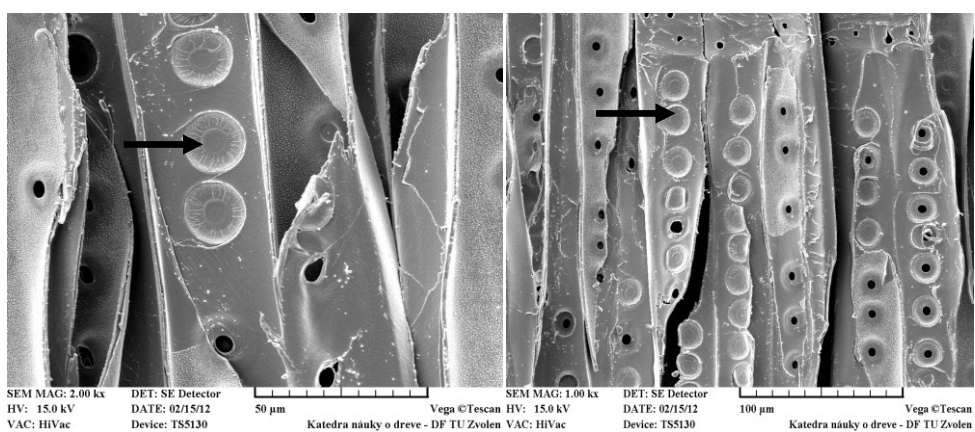
Obr. 6.33 – B33

Obr. 6.34 - B34



Obr. 6.35 – B35

Obr. 6.36 – B36

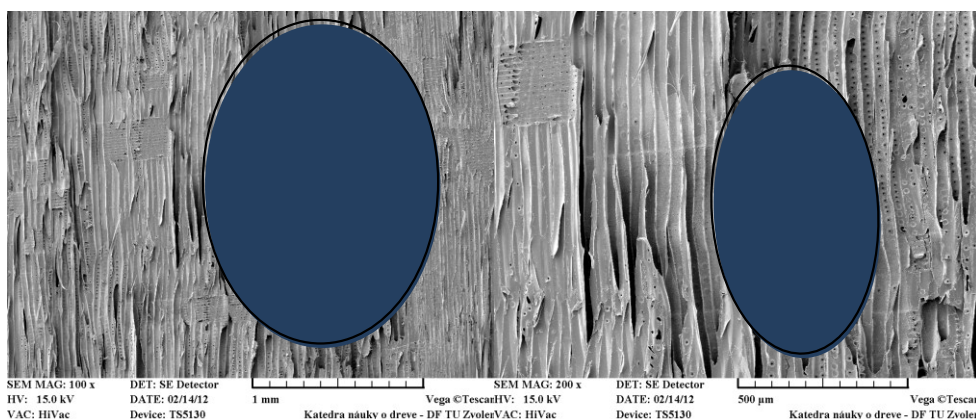


Obr. 6.37 – B37

Obr. 6.38 – B38

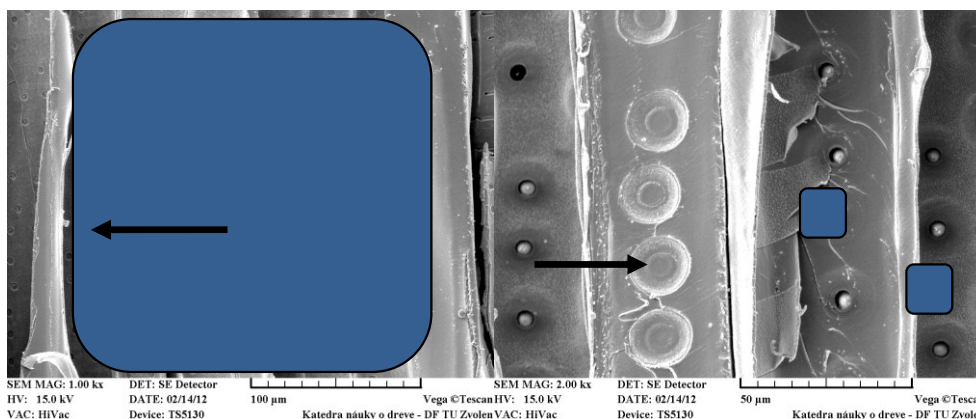
Poloha B3

Snímané plochy jsou více s tupými frakturami než s jehlicovitými (obr. 6.39 – B39, 6.40 – B40). Křížové pole nepoškozené, ojedinělý výskyt hyf (obr. 6.41 – B41). Vnitřní povrch tracheid je výrazně posetý bradavicemi (obr. 6.42 – B42). Velké množství dvojteček má aspirovaný torus (obr. 6.43 – B43), margo je nevýrazné (obr. 6.44 – B44).



Obr. 6.39 – B39

Obr. 6.40 – B40



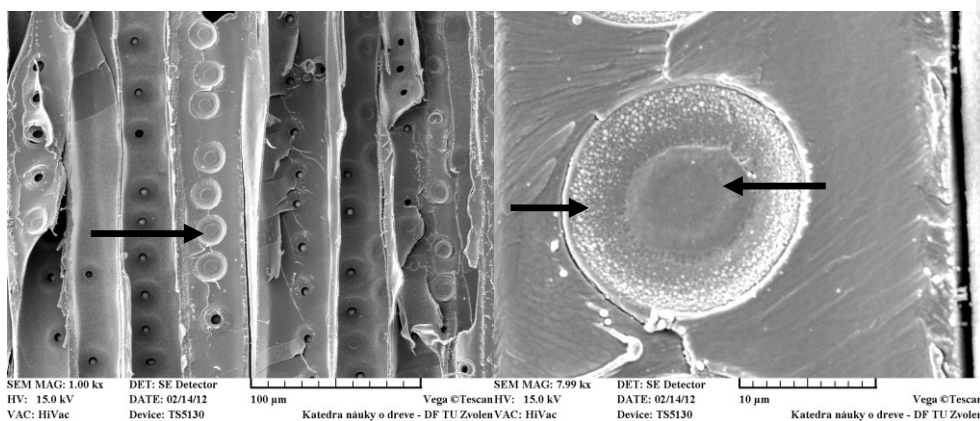
Obr. 6.41 – B41

Obr. 6.42 – B42

Tangenciální plocha, poloha B2

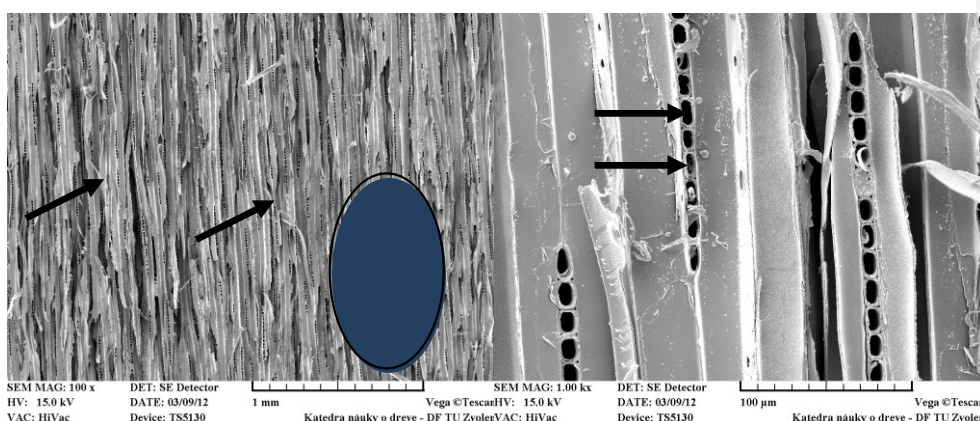
Fraktury ploch vláknité i tupé (obr. 6.45 – B45). Podélné fraktury vláken probíhají přes střední lamelu a primární stěnu a taktéž v buněčných stěnách (poměr 50 : 50). V parenchymatických buňkách dřevových paprsků je méně jádrových látek než ve

vzorku A (obr. 6.46 – B46). V lumenech vláken je patrný bradavičnatý povrch (obr. B47, B48).



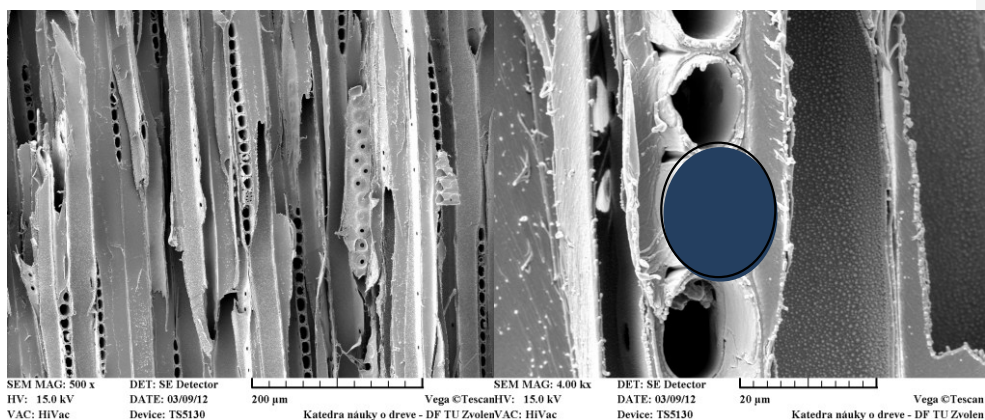
Obr. 6.43 – B43

Obr. 6.44 – B44



Obr. 6.45 – B45

Obr. 6.46 – B46



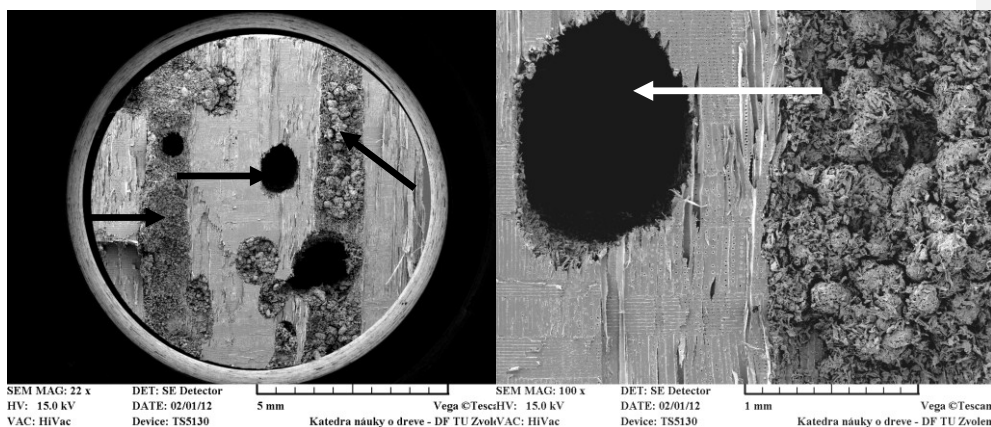
Obr. 6.47 – B47

Obr. 6.48 – B48

6.3.3 Vzorek C

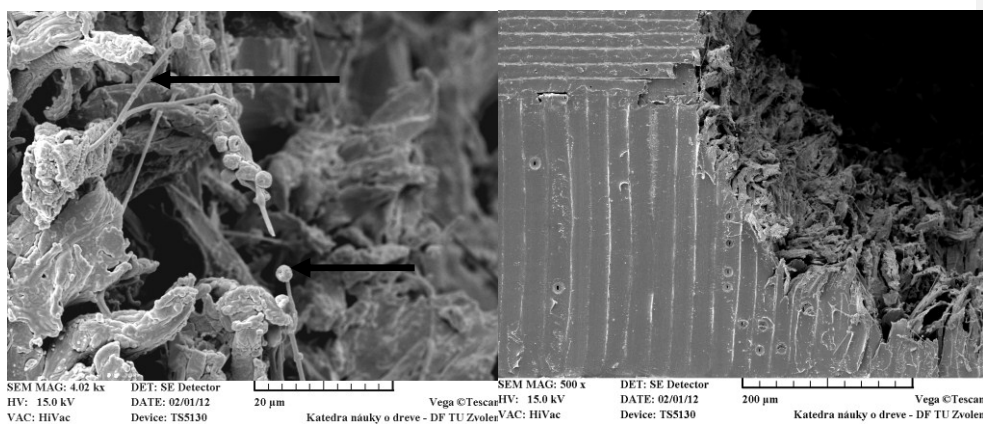
Poloha C1

Dřevo silně poškozené dřevokazným hmyzem. Požerky o průměru 1 mm (obr. C49). V požerkách se nachází drť granulovaná nebo s jemnou strukturou. Požerky podélné i příčné (obr. 6.50 – C50). Plocha vedená přes střední lamelu, až primární stěnu. Uvolňování střední lamely i dřevových parsků. Lomové plochy tracheid tupé (obr. 6.54 – C54). Přítomnost hub identifikovaná jenom v drti v požercích (obr. 6.51 – C51), ve dřevě nikoli (obr. 6.52 – C52). Na dvojtečkách výrazné oddělování torusu od marga (obr. 6.53 – C53).



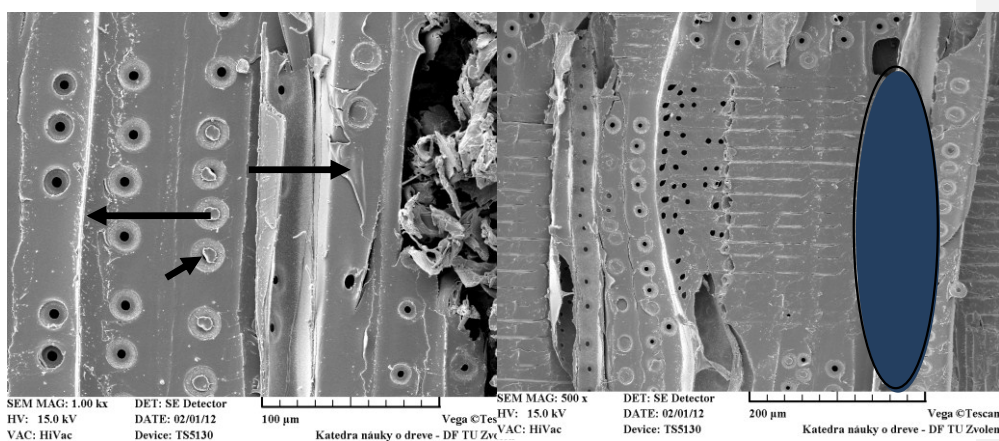
Obr. 6.49 – C49

Obr. 6.50 – C50



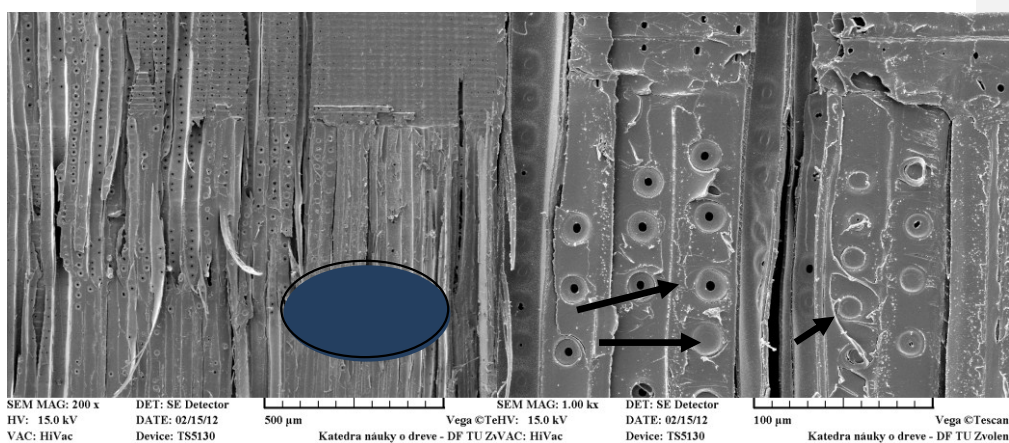
Obr. 6.51 – C51

Obr. 6.52 – C52



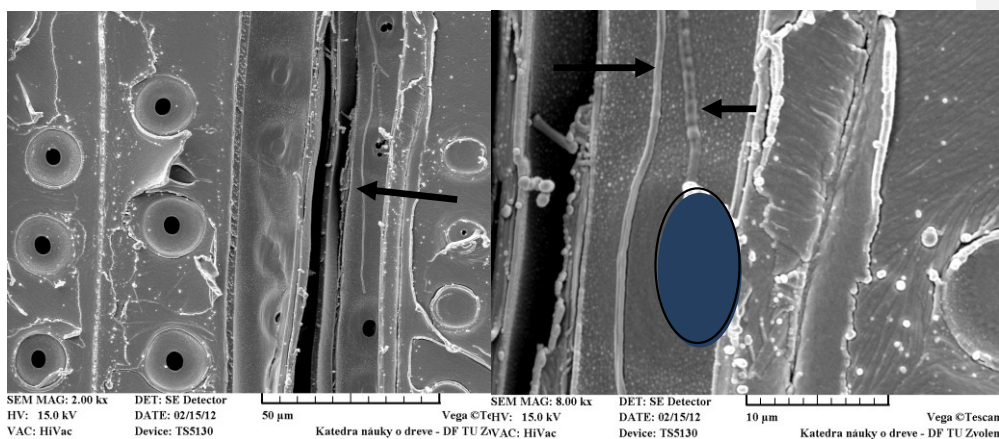
Obr. 6.53 – C53

Obr. 6.54 – C54



Obr. 6.55 – C55

Obr. 6.56 – C56



Obr. 6.57 – C57

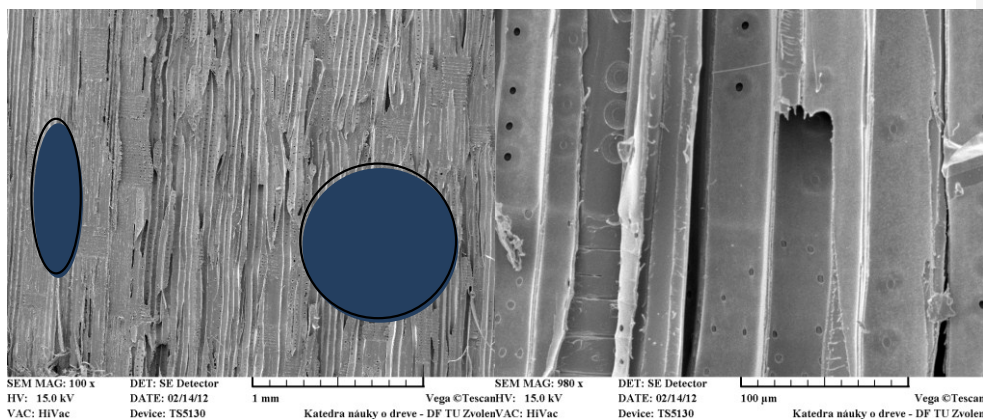
Obr. 6.58 – C58

Poloha C2

Lomové fraktury tupé i jehlicovité (obr. 6.55 – C55). Snímaná plocha vedená přes střední lamelu až primární stěnu, dvojtečky částečně aspirované (obr. C56). Hyfy přítomné v lumenech tracheid (obr. C57), procházejí přes torusy, kde perforují torus (obr. C58).

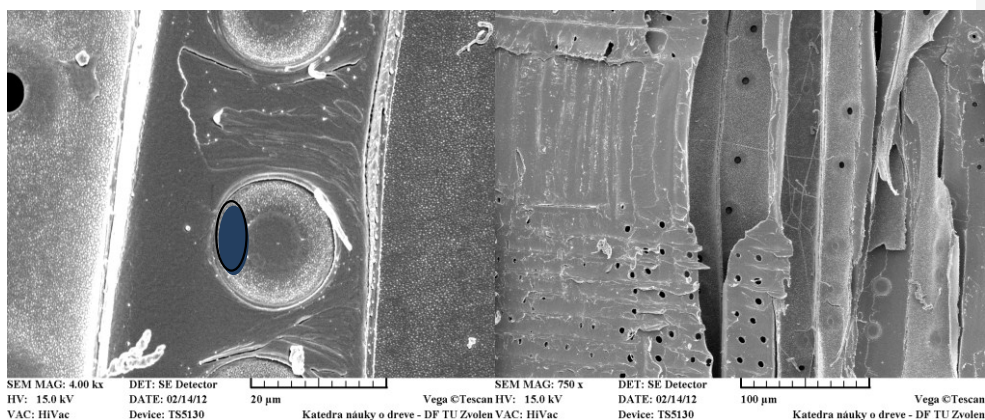
Poloha C3

Plochy tupé v jarním dřevě, jehlicovité v letním dřevě (obr. C59). Lumény tracheid bradavičnaté (obr. C60). Dvojtečky s bradavičnatým povrchem (obr. C61), mnohé jsou aspirované. Přítomnost hyf v lumenech tracheid jarního dřeva (obr. C62).



Obr. 6.59 – C59

Obr. 6.60 – C60

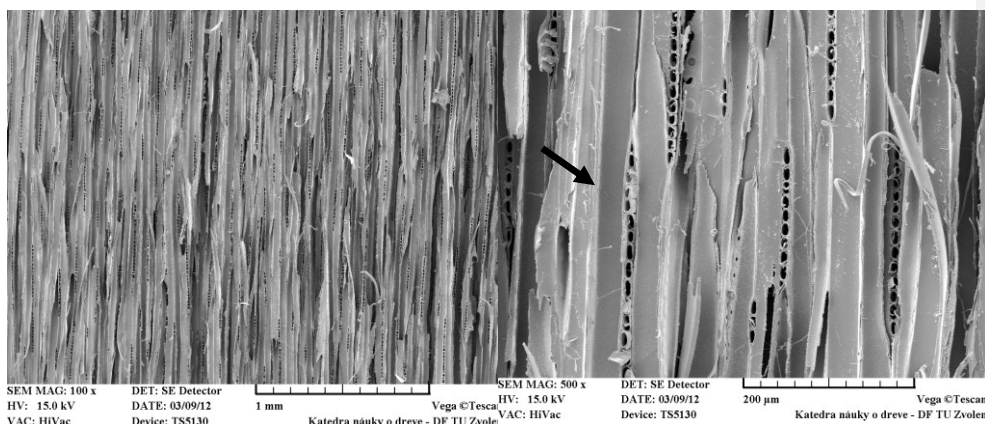


Obr. 6.61 – C61

Obr. 6.62 – C62

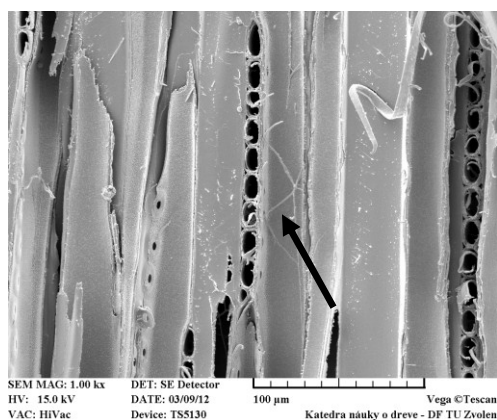
Tangenciální plocha, poloha C2

Plochy s tupými frakturami vláken, vedené podélně přes buněčnou stěnu a i přes střední lamelu (obr. C63, C64). V lumenech vláken bradavičnatý povrch s častým výskytem hyf (obr. C65, C66). Jádrové látky v lumenech parenchymatických buněk se téměř nenachází (obr. C64).

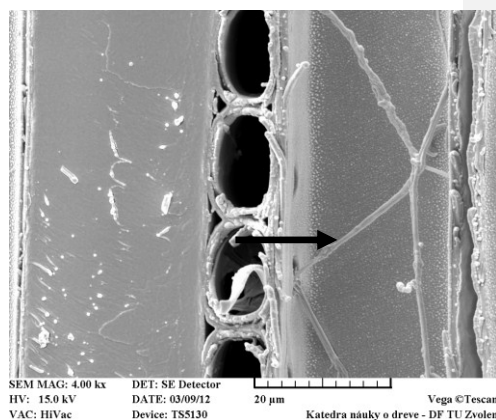


Obr. 6.63 – C63

Obr. 6.64 – C64



Obr. 6.65 – C65

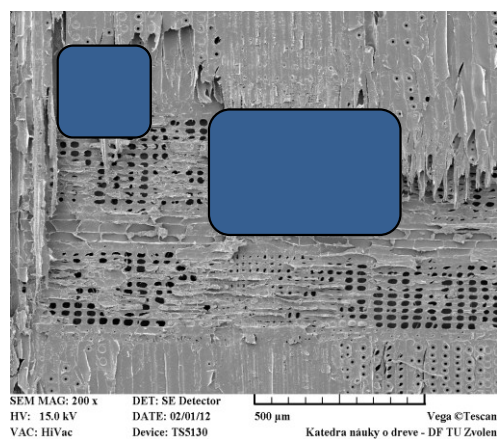


Obr. 6.66 – C66

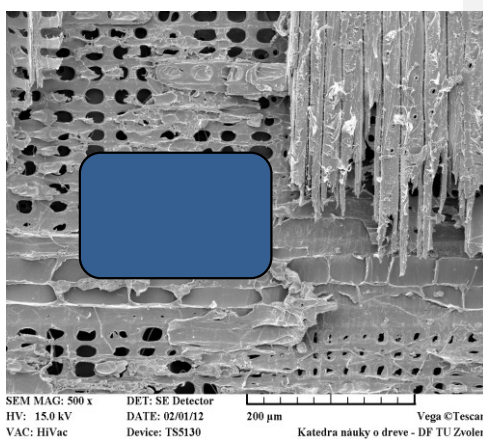
6.3.4 Vzorek D

Poloha D1

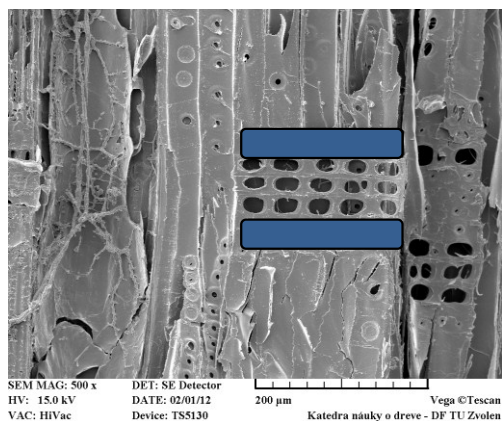
Štěpné plochy s jehlicovitými až tupými frakturami tracheid, vlákna se oddělují hlavně ve střední lamele (obr. D67). Dřeňové paprsky heterogenní s příčnými tracheidami na okraji (obr. D69). Přítomnost hyf v dřeňovém paprsku (obr. D69, D71). Dvojtečky s bradavičnatým povrchem (obr. D72) a s poměrně tlustým torusem částečně odtrženým od marga (obr. D73). Některé dvojtečky silně aspirované (obr. D74). Na hyfách jsou zřejmě bakterie (obr. D75).



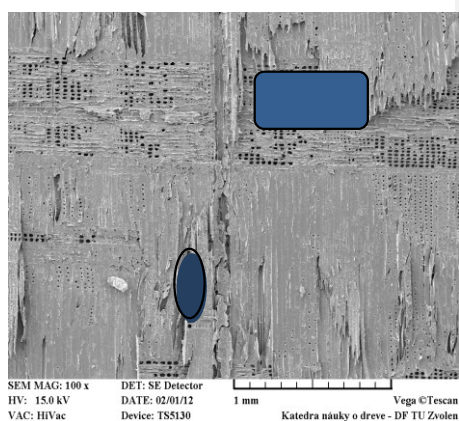
Obr. 6.67 – D67



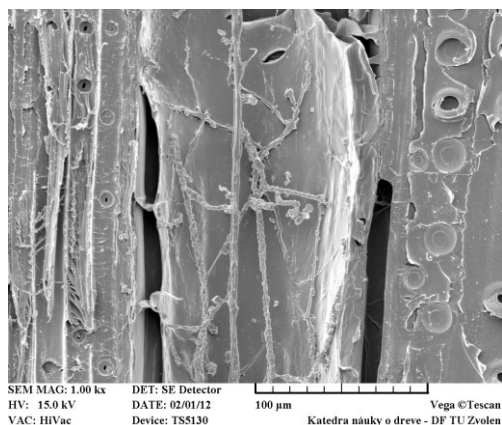
Obr. 6.68 – D68



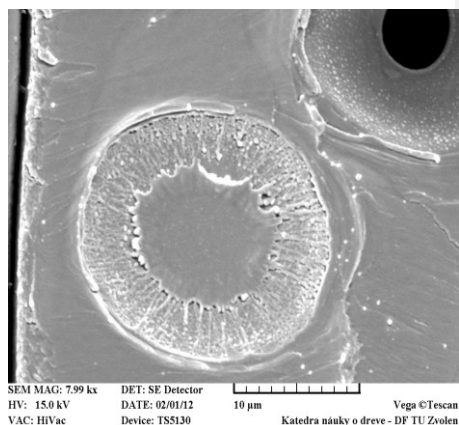
Obr. 6.69 – D69



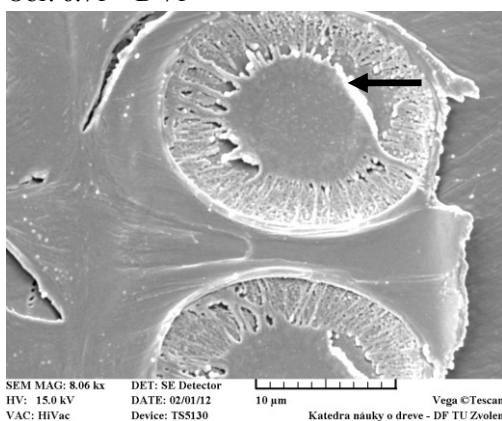
Obr. 6.70 – D70



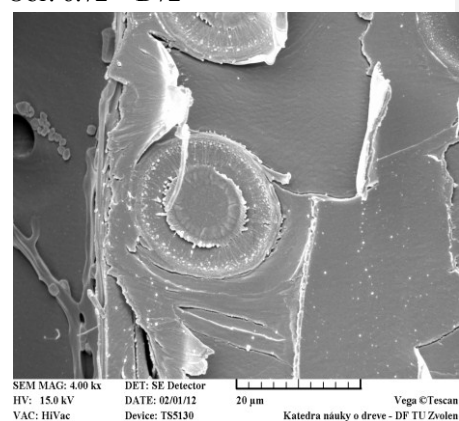
Obr. 6.71 – D 71



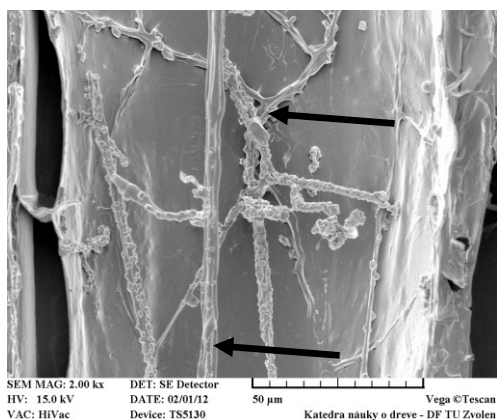
Obr. 6.72 – D72



Obr. 6.73 – D73



Obr. 6.74 – D74



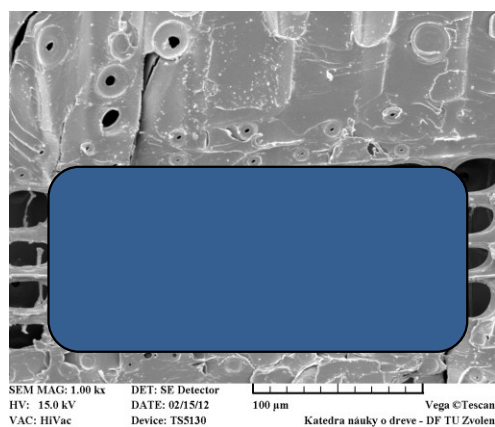
Obr. 6.75 – D75

Poloha D2

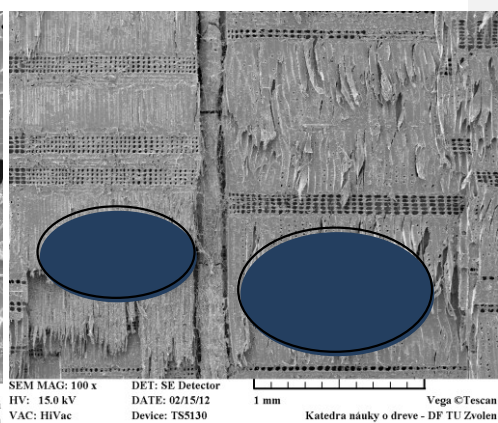
Fraktury tracheid na štěpné ploše jehlicovitě v letním dřevě, částečně tupé v jar-ním dřevě (obr. D77). Dřevo výrazně degradované houbami. Početné hyfy v dřevěném paprsku (obr. D78, D79).

Poloha D3

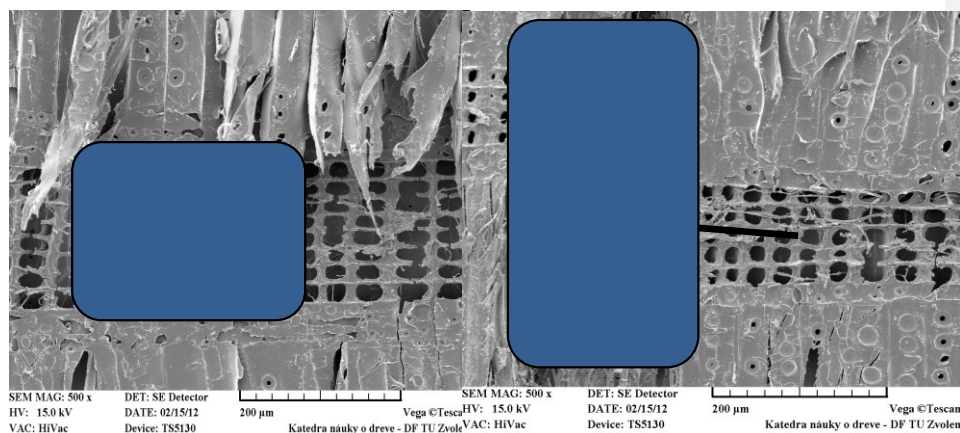
Na štěpné ploše převládají jehlicovité fraktury tracheid (obr. D80). Dvojtečky s bradavičnatým povrchem (obr. D82) hodně aspirované (obr. D81). Velmi dobře vidi-telná marga. Hyfy nezřetelné, ani v lumenech tracheid, ani v dřevěných paprscích neby-ly pozorované hyfy (obr. D83).



Obr. 6.76 – D76

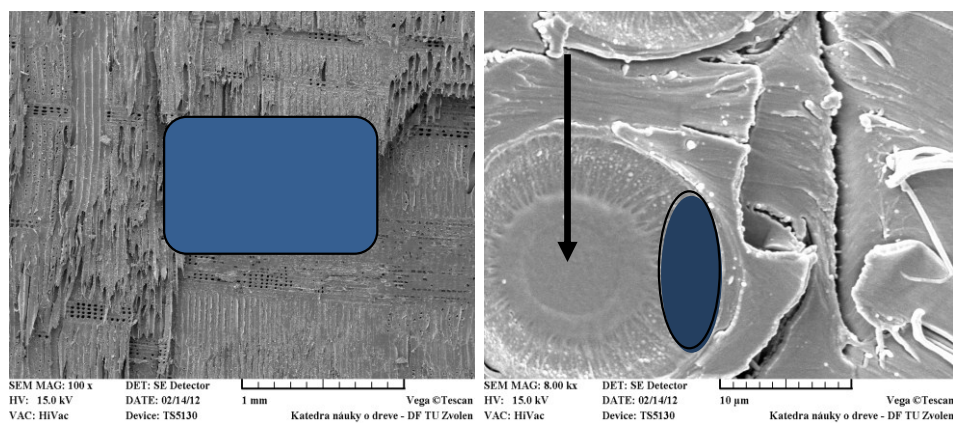


Obr. 6.77 – D77



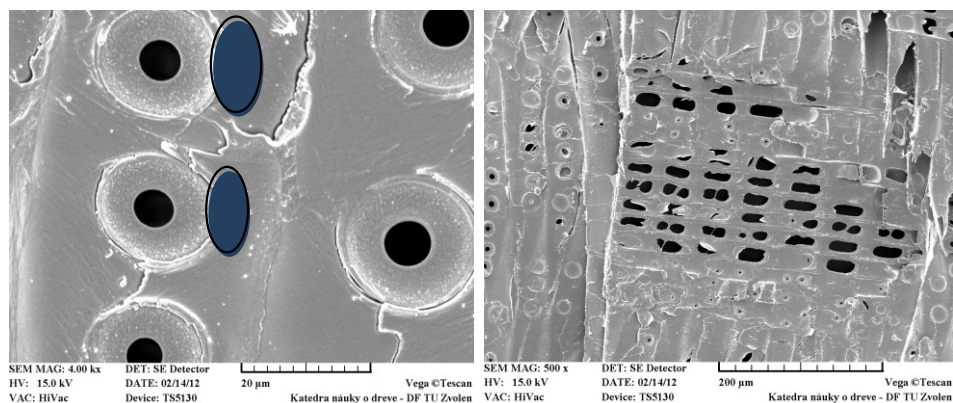
Obr. 6.78 – D 78

Obr. 6.79 – D79



Obr. 6.80 – D80

Obr. 6.81 – D81

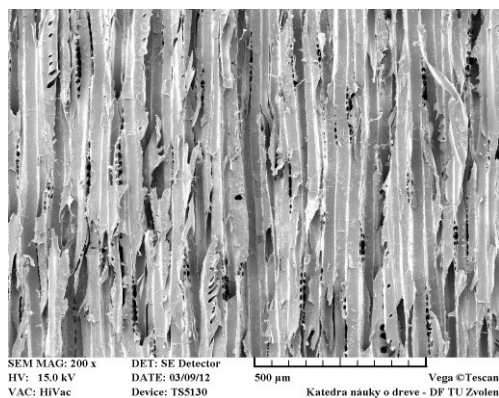


Obr. 6.82 – D82

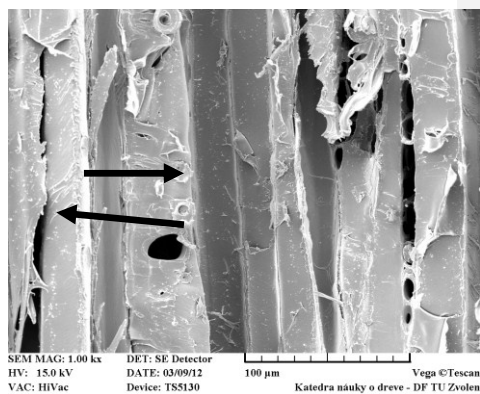
Obr. 6.83 – D83

Tangenciální štěpná plocha, poloha D2

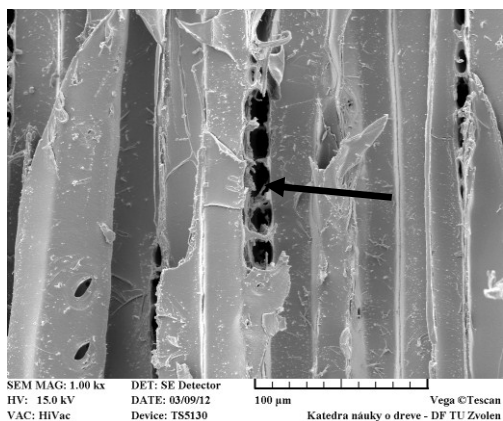
Štěpné tangenciální plochy s tupými, křehkými příčnými frakturami vláknitých buněk (obr. D84). Podélné oddělování vláken ve štěpné ploše, zejména ve střední lamelě a v primární stěně (obr. D85). Dřeňové paprsky (obr. D86, D87) výrazně degradované hyfami hub.



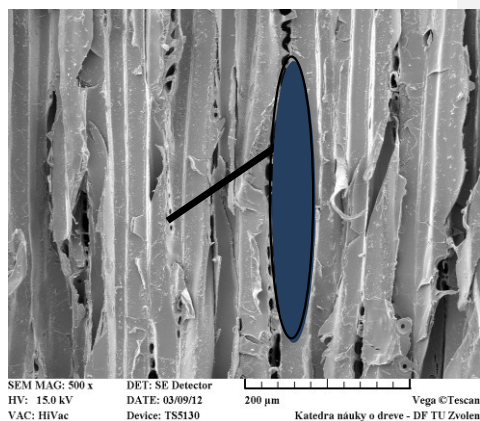
Obr. 6.84 – D84



Obr. 6.85 – D85



Obr. 6.86 – D86

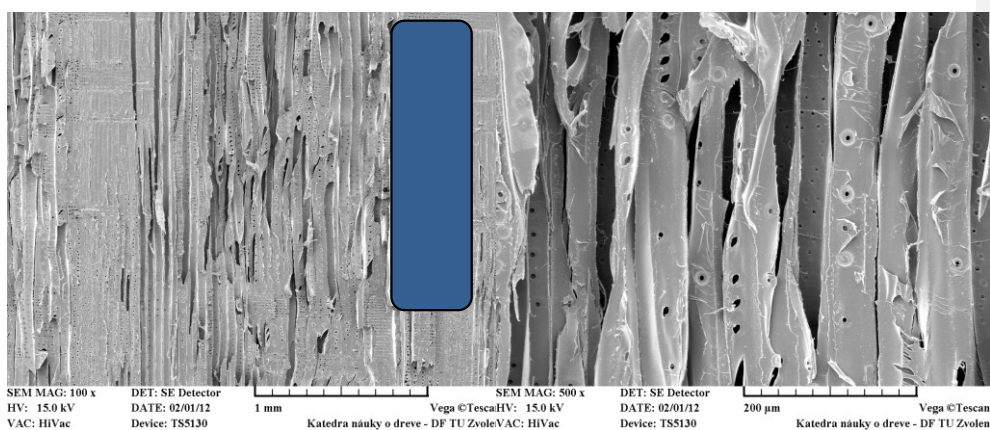


Obr. 6.87 – D87

6.3.5 Vzorek E

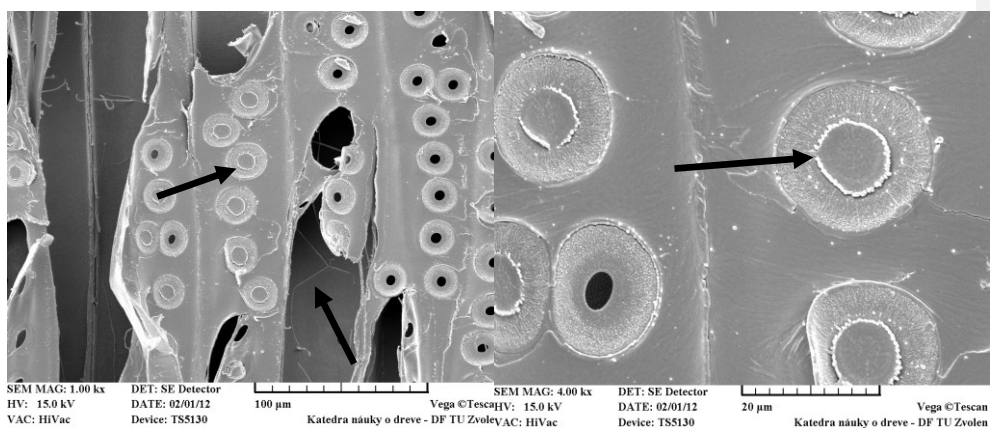
Poloha E1

Štěpná plocha hladká, čistá. Lomy tracheid tupé v jarním dřevě, štípání probíhá skrze střední lamelu a primární stěnu (obr. E89). Letní dřevo při štípání uvolňované ve střední lamele, bez jehlicovitých fraktur tracheid (obr. E88). Dvojtečky s bradavičnatým povrchem (obr. E92). Torusy se odtrhávají od marga (obr. E90, E91). Přítomnost hyf pozorovaná málo, ojedinelé v lumenech tracheid (obr. E90).



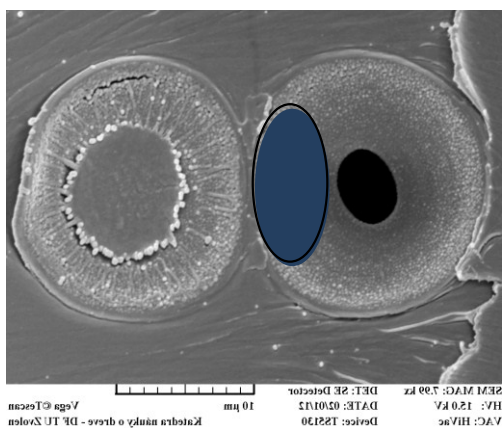
Obr. 6.88 – E88

Obr. 6.89 – E89



Obr. 6.90 – E90

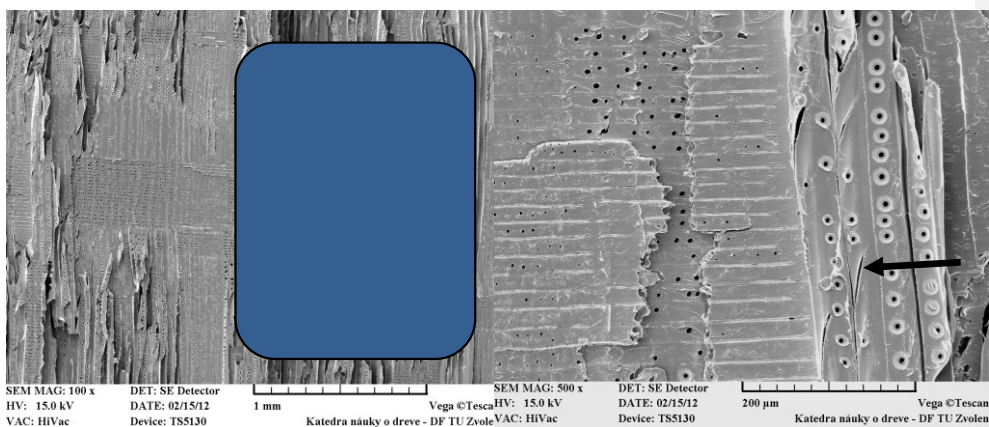
Obr. 6.91 – E91



Obr. 6.92 – E92

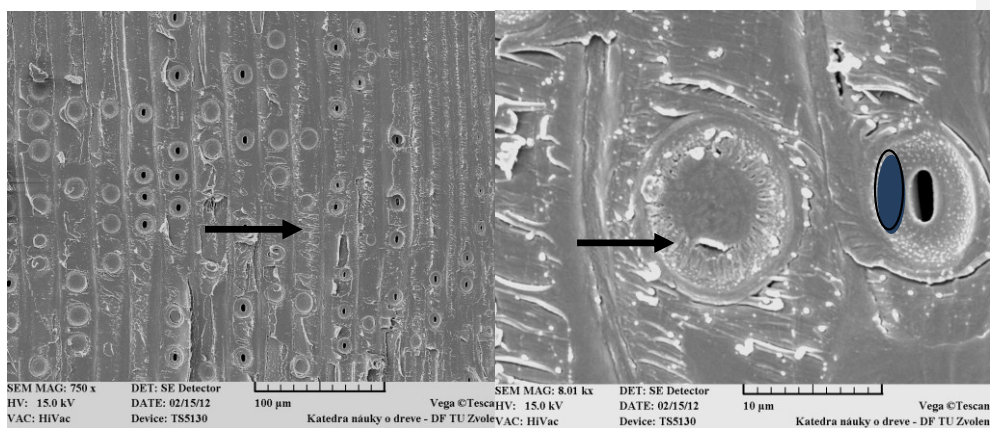
Poloha E2

Štěpná plocha s tupým lomem tracheid v jarním dřevu (obr. E93). Letní dřevo rovnoměrně oddělované ve střední lamele. Na stěnách tracheid se objevují trhliny vedené pod úhlem 30-40°, což je znakem přítomnosti reakčního dřeva (obr. E94). Dvojtečky s typickým bradavičnatým povrchem (obr. E96). Na dvojtečkách letního dřeva je margo zhrublé (obr. E96). Uvolňování vazby ve střední lamele a v primární stěně (obr. E95).



Obr. 6.93 – E93

Obr. 6.94 – E94

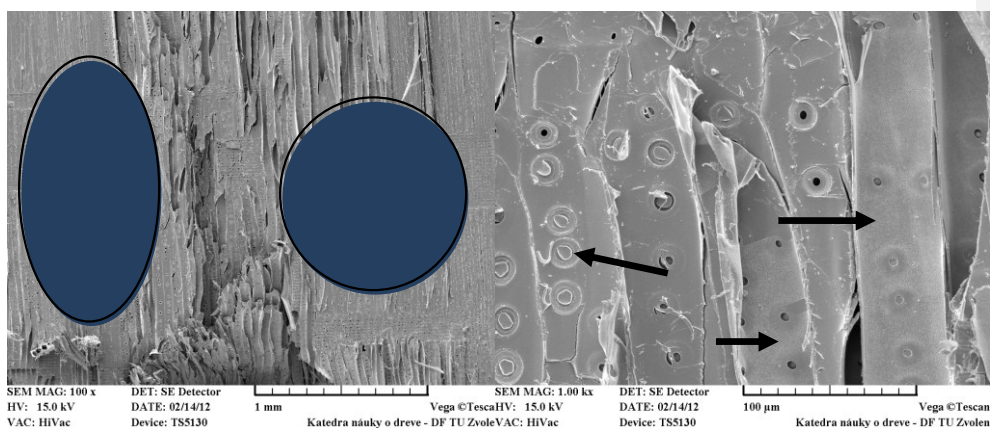


Obr. 6.95 – E95

Obr. 6.96 – E96

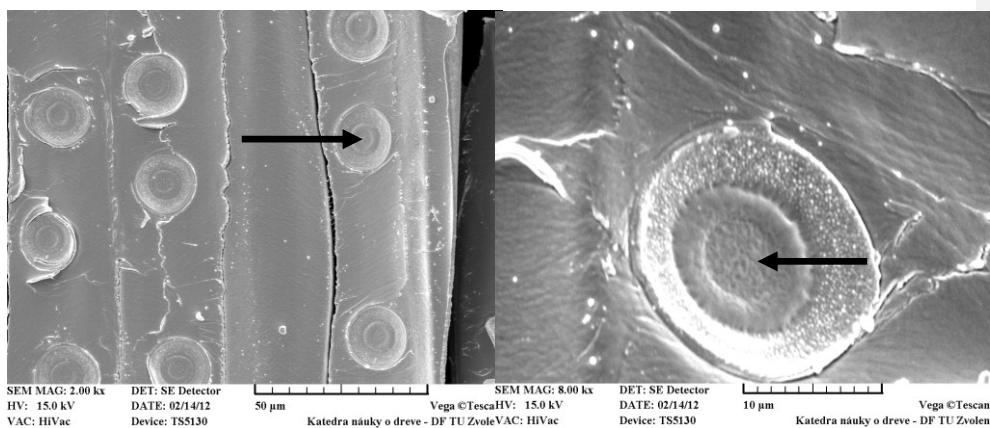
Poloha E3

Lomy tracheid na štěpné ploše křehké, tupé v jarním dřevě. Letní dřevo se odděluje hladce ve střední lamele (obr. E97). Lumeny tracheid s bradavičnatým povrchem (obr. E98). Mnoho dvojteček s aspirovaným, silně přisátým torusem na porusu (obr. E99, E100). Dvojtečky, které nejsou aspirované, mají často torus odtržený od marga (obr. E98). Hyfy nebyly pozorované.



Obr. 6.97 – E97

Obr. 6.98 – E98

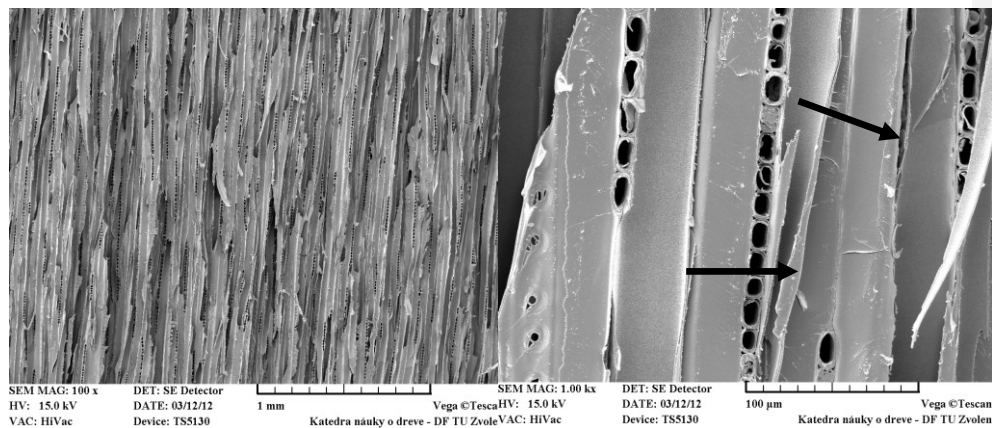


Obr. 6.99 – E99

Obr. 6.100 – E100

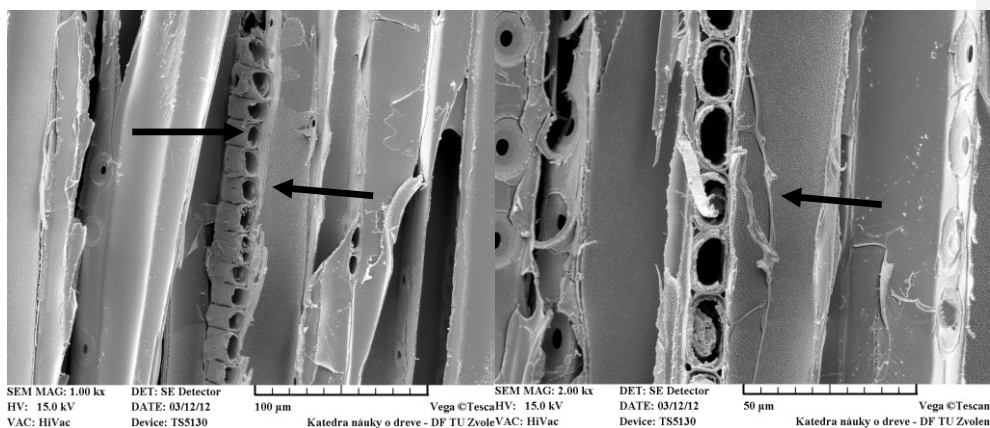
Tangenciální štěpná plocha, poloha E2

Fraktury vláken na štěpných plochách spíše tupé než vláknité (obr. E101). Podélné trhání vláken přes buněčné stěny i ve středních lamelách (obr. E102). Dřeňové paprsky obsahují málo jádrových látek, v lumenech vláknitých buněk bradavičnatý povrch (obr. E103). Ojediněle jsou v lumenech vláken přítomny hyfy hub (obr. E104).



Obr. 6.101 – E101

Obr. 6.102 – E102



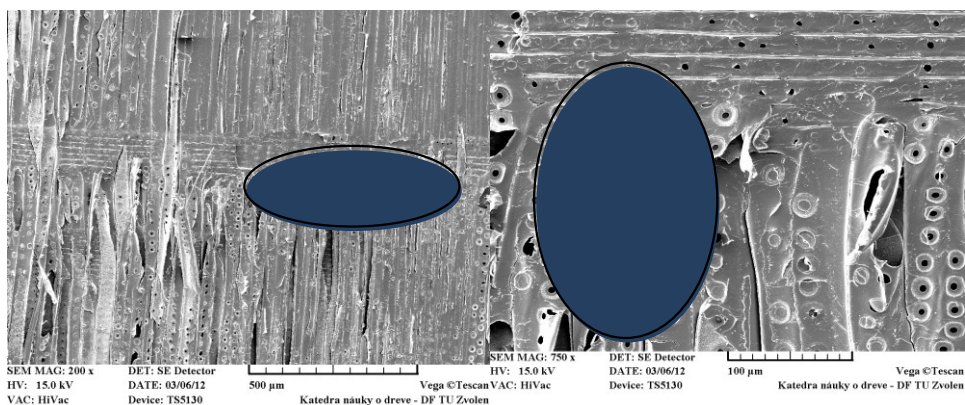
Obr. 6.103 - E103

Obr. 6.104 - E104

6.3.6 Vzorek F – referenční recentní dřevo

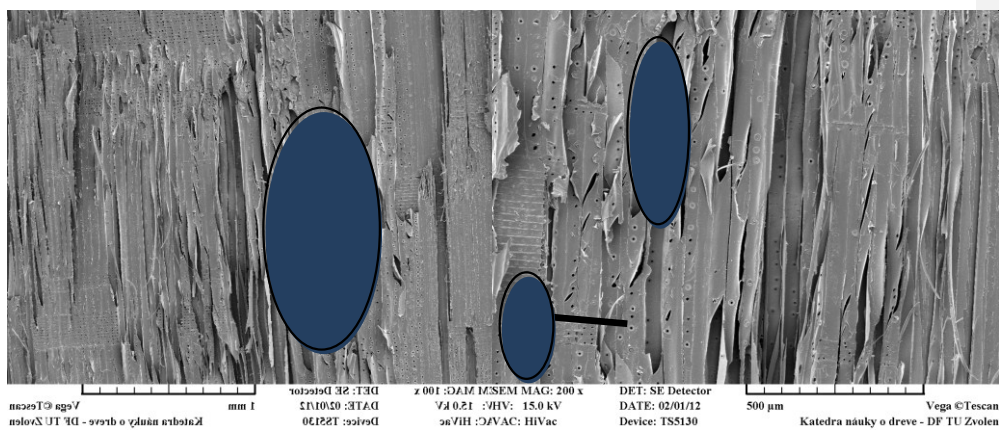
Poloha F1

Štěpná plocha vykazuje znaky nedegradovaného dřeva (obr. F107). Lomy tracheid jehlicovité v letním dřevě (obr. F105), lomy jarního dřeva tupé (obr. F108), anebo se tracheidy oddělují ve střední lamele bez lámání v buněčné stěně (obr. F106). Lumeny tracheid vystlané bradavičnatou strukturou (obr. F110). Dvojtečky s bradavičnatým povrchem otevřené i aspirované (obr. F111) s poměrně hrubým margem. Částečné odtrhávání torusu od marga (obr. F112). Na tracheidách výskyt trhlin s poměrně velkým úhlem (obr. F108), což souvisí s přítomností reakčního dřeva pravděpodobně v blízkosti suku.



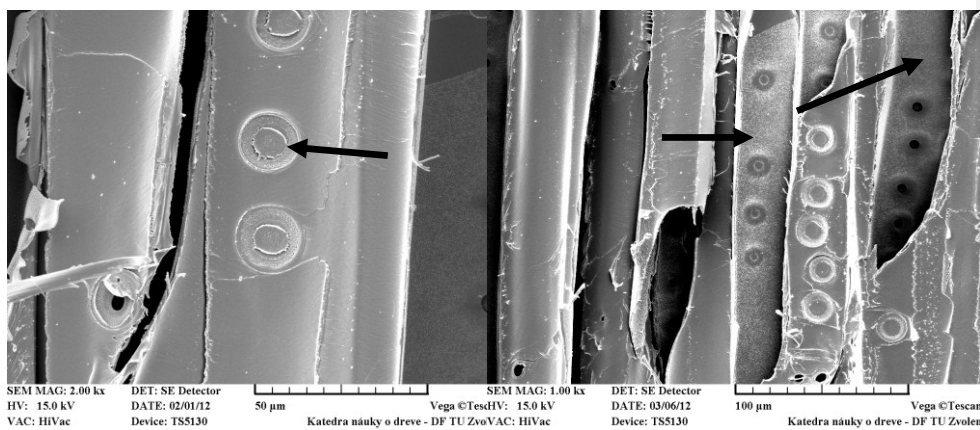
Obr. 6.105 – F105

Obr. 6.106 – F106



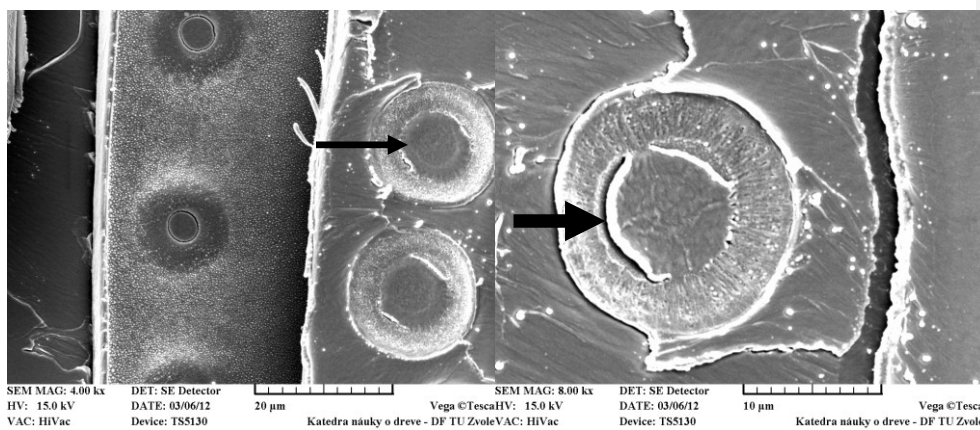
Obr. 6.107 – F107

Obr. 6.108 – F108



Obr. 6.109 – F109

Obr. 6.110 – F110

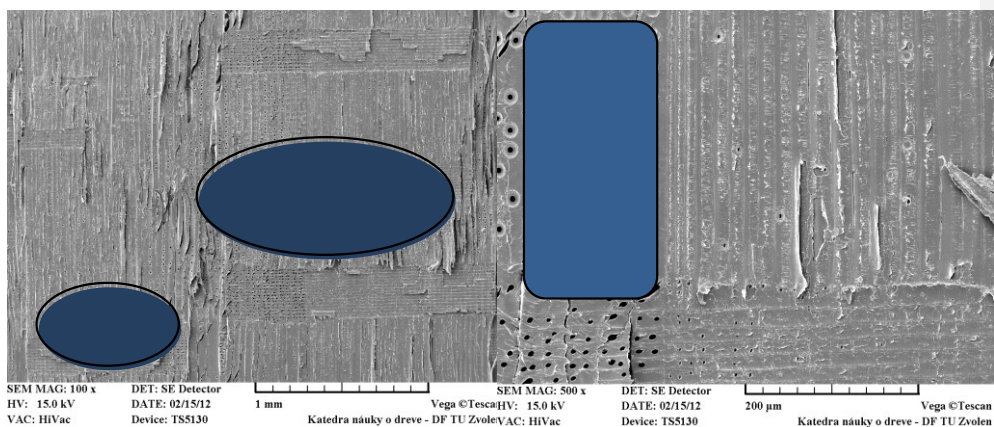


Obr. 6.111 – F111

Obr. 6.112 – F112

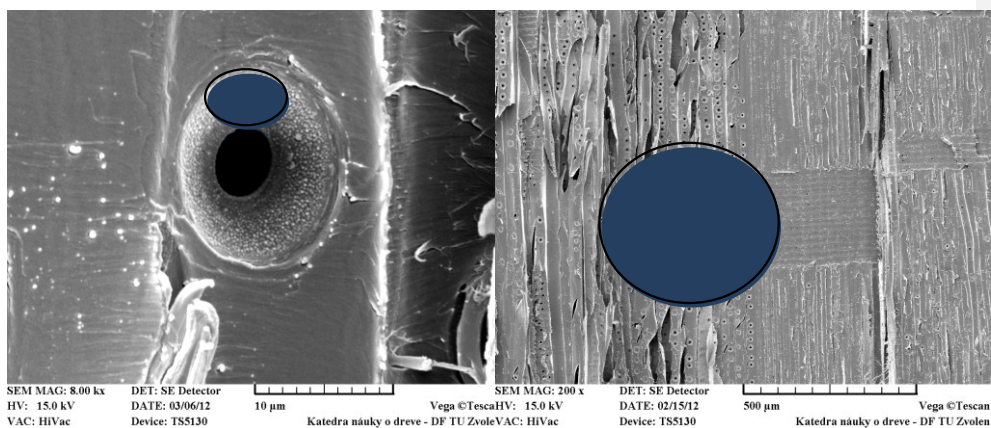
Poloha F2

Štěpná plocha vykazuje pravidelné podélné dělení dřeva ve střední lamele a přes dřeňové paprsky (obr. F113). V křížovém poli a i na tracheidách trhliny vedené pod velkým úhlem 30–40°, což dokumentuje přítomnost reakčního dřeva (obr. F116). Dvojtečky s bradavičnatým povrchem (obr. F115), mnohé jsou aspirované, přisáté na porus (obr. F114).



Obr. 6.113 – F113

Obr. 6.114 - F114

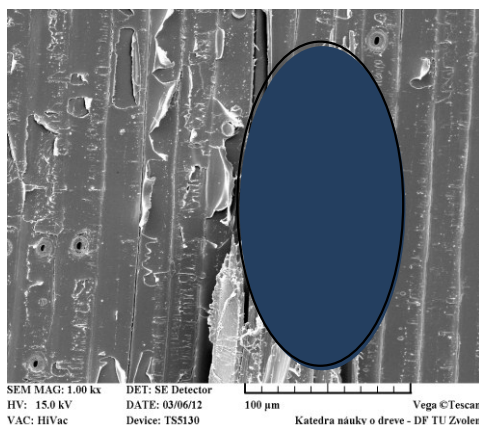


Obr. 6.115 – F115

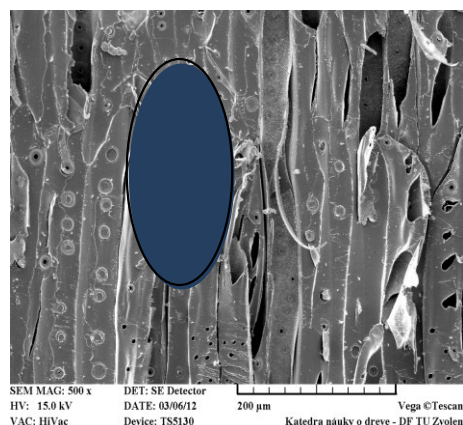
Obr. 6.116 - F116

Poloha F3

Štěpná plocha s jehlicovitými frakturami v letním dřevě (obr. F117) a tupými frakturami, anebo bez fraktur v jarním dřevě (obr. F118). Fibrily orientované pod velkým úhlem cca 30°. Dvojtečky s bradavičnatým povrchem (obr. F119). Úhel uložení mikrofibril svědčí spíše o juvenilním dřevu než o reakčním dřevu (obr. F120).



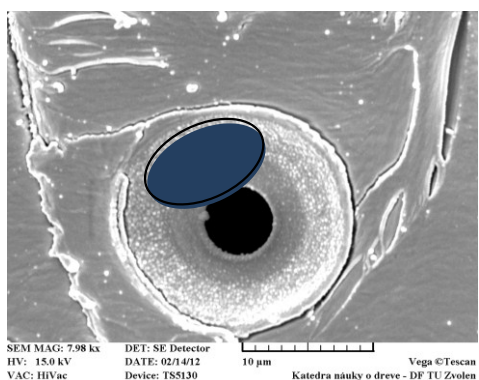
Obr. 6.117 – F117



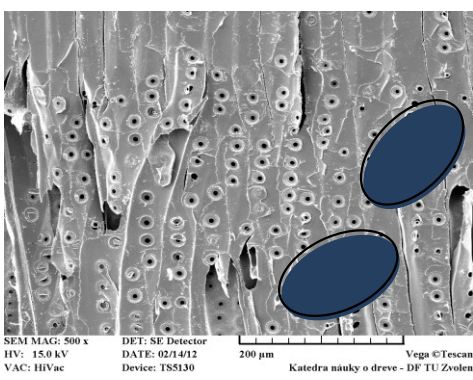
Obr. 6.118 – F118

Tangenciální štěpná plocha, poloha F2

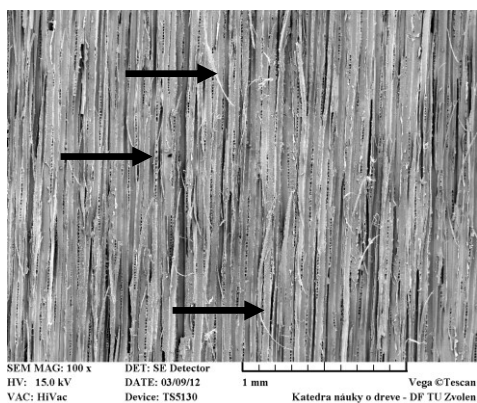
Štěpná plocha s vláknitými frakturami (obr. F121). Podélné fraktury vedené často v buněčné stěně (obr. F122). Vdřeňových paprscích výskyt jádrových látek (obr. F123) a patrný ojedinělý výskyt krystalů (obr. F124). Lumeny vláken jsou pokryté bradavičnatou strukturou (obr. F123).



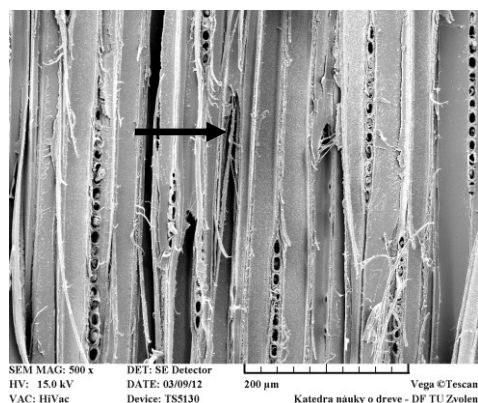
Obr. 6.119 - F119



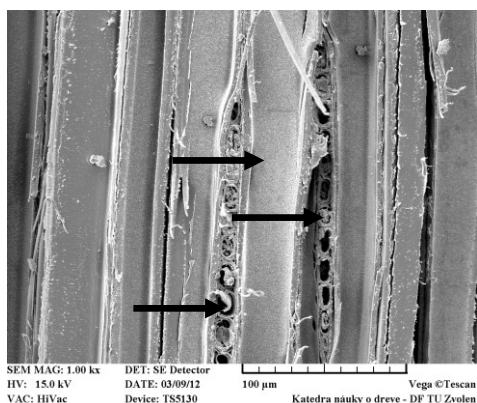
Obr. 6.120 - F120



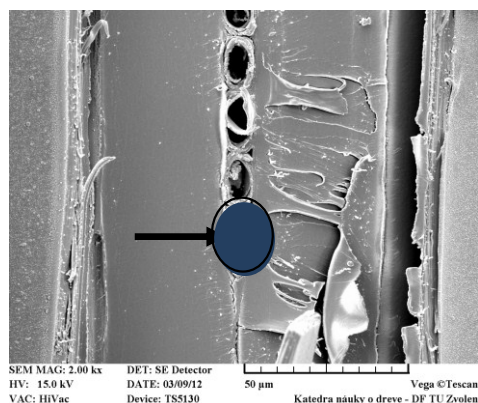
Obr. 6.121 - F121



Obr. 6.122 – F122



Obr. 6.123 - F123



Obr. 6.124 – F124

6.4 Chemická analýza dřeva

6.4.1 Výsledky množství terpenů při dlouhodobém používání a po termické ochraně dřeva

Cílem analýzy bylo zjistit změny množství terpenů ve dřevě v závislosti na době jeho používání jako stavebního materiálu a vliv termické úpravy na snížení obsahu terpenů v jedlovém dřevě. V tab. 6.18 je uvedeno množství terpenů ve vzorcích termicky neupravených.

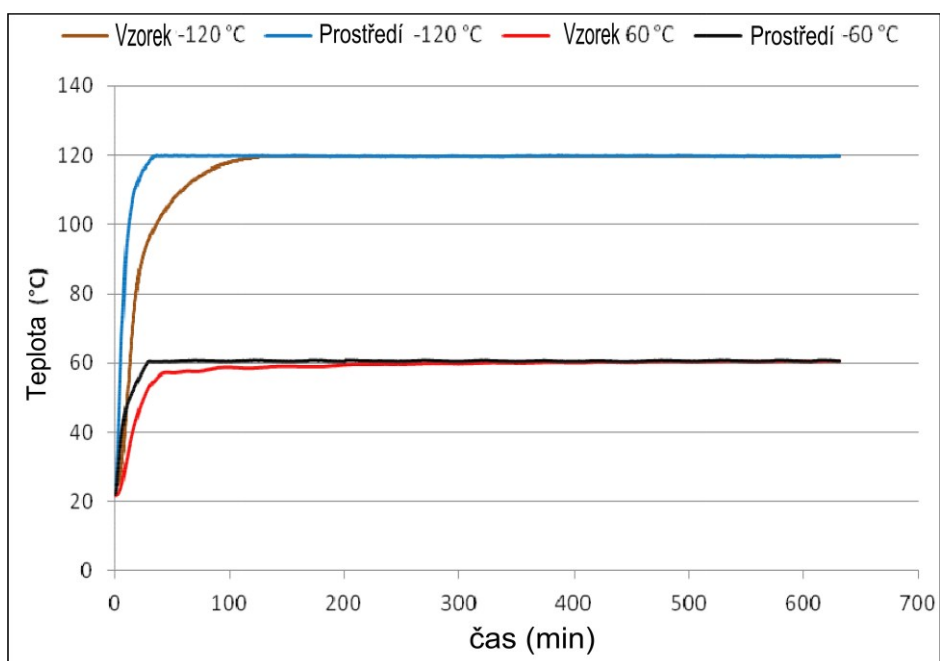
Tab. 6.18: Množství terpenů ve vzorcích neupraveného dřeva (mg.kg^{-1})

| Compounds | A | B | C | D | E | F |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|---------|----------|
| α -pinene | 0,5591 | 0,9940 | 5,5471 | 4,3292 | 34,8298 | 115,4721 |
| camphene | - | - | - | 0,3871 | 5,0133 | 12,3156 |
| β -pinene | 0,2759 | 0,2989 | 0,5565 | 0,1918 | 0,5448 | 20,9857 |
| α -phellandrene | 0,2989 | 0,3795 | 0,2715 | - | 1,4577 | 1,6450 |
| cymene | 0,0000 | 0,6989 | 0,0000 | - | 2,0209 | 6,1589 |
| limonene | 1,0155 | 2,0284 | 1,1708 | 1,0672 | 1,5015 | 6,1684 |
| fenchol | - | - | - | - | 0,5582 | 2,3811 |
| borneol | - | - | - | - | 1,0892 | 3,3375 |
| thymol | - | 0,2284 | - | 0,5200 | 1,2312 | 4,3070 |
| myrtenal | 0,5330 | 0,8778 | 0,5144 | 1,2875 | 5,1788 | 6,1012 |
| verbenone | 0,4081 | 0,4279 | - | 0,7923 | 5,2141 | 7,6208 |
| Total | 3,0906 | 5,9338 | 8,0603 | 8,5751 | 58,6394 | 186,4933 |

*st. odchylka od 0,0023 po 0,214 pro jednotlivé látky

Rychlost uvolňování terpenů z vytěženého dřeva závisí na velikosti vzorků, vlhkosti, teplotě, jakož i na způsobu dalšího zpracování. Zvýšená teplota výrazně urychluje emisi terpenů ze dřeva, což se projevuje např. při různých způsobech sušení, přičemž existuje několik mechanismů pohybu a uvolnění terpenů ze dřeva [72]. Při termickém ošetření dřeva (termosanace) se používá horký vzduch s teplotou 120 °C, který působí na povrch dřeva. V důsledku velkých rozměrů konstrukčních prvků, jakož i úniku tepla z reálných budov je prostup tepla pomalejší, než je tomu v případě laboratorních vzorků. Při termosanaci v praxi je cílem dosáhnout ve středu nosníku teploty min. 55 °C, aby se dosáhlo denaturace bílkovin dřevokazného hmyzu, čímž dojde k jeho usmrcení.

Z uvedeného důvodu se v laboratorních podmínkách použily pro termickou úpravu 2 teploty (60 a 120 °C), jelikož v malých zkušebních těliscích byly teploty rychle dosažené v celém průřezu vzorků (obr. 6.125).



Obr. 6.125: Teploty v sušárně a ve vzorcích při termické úpravě 60 °C a 120 °C

Zvýšená teplota zapříčiňuje rychlejší uvolňování terpenů do okolí, což způsobuje jejich nižší koncentraci v termicky ošetřeném vzorku (tab. 6.19 a 6.20). Na obr. 6.126 je grafické zobrazení množství terpenů v původních i termicky upravených vzorcích.

Tab. 6.19: Množství terpenů ve vzorcích ošetřeného dřeva při teplotě 60 °C (mg.kg^{-1})

| Compounds | A | B | C | D | E | F |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| α -pinene | 0,2766 | - | 0,5243 | 2,4906 | 24,7044 | 43,5522 |
| camphene | - | - | 0,7200 | - | 4,1916 | 8,4603 |
| β -pinene | - | - | - | 0,3041 | 0,4841 | 0,8930 |
| α -phellandrene | - | - | - | 0,3971 | 1,4752 | 0,9597 |
| cymene | - | - | - | 0,5163 | 1,3008 | 3,8669 |
| limonene | 0,8267 | 0,6107 | 0,6847 | 2,3443 | 0,8725 | 0,7227 |
| fenchol | - | - | - | - | 0,6654 | 0,5609 |
| borneol | - | - | - | - | 1,2818 | 1,2658 |
| thymol | 0,2809 | 0,2492 | 0,3240 | 0,2441 | 1,3113 | 3,3447 |
| myrtenal | 0,6276 | 0,5774 | 0,8914 | 1,0085 | 4,8605 | 3,0267 |
| verbenone | - | 0,2620 | 0,2965 | 0,3579 | 8,4572 | 3,1520 |
| Total | 2,0119 | 1,6993 | 3,4410 | 7,6630 | 49,6046 | 69,8048 |

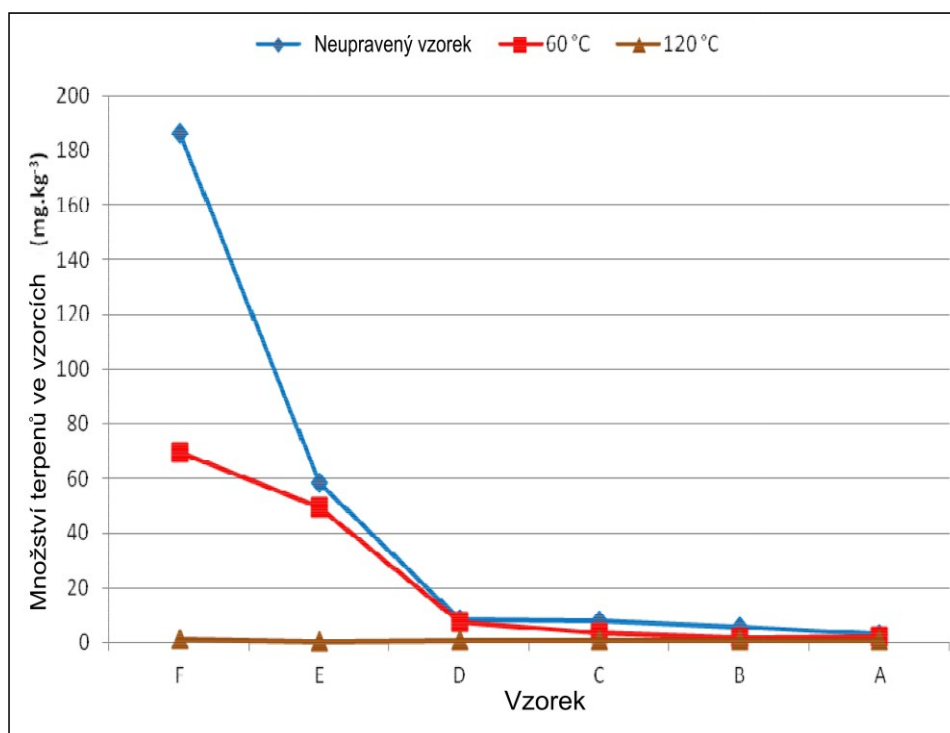
*st. odchylka od 0,0033 po 0,166 pro jednotlivé látky

Výsledky

Tab. 6.20: Množství terpenů ve vzorcích ošetřeného dřeva při teplotě 120 °C (mg.kg^{-1})

| Compounds | A | B | C | D | E | F |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| α -pinene | 0,1141 | - | - | - | 0,0826 | 0,1687 |
| camphene | - | - | - | - | 0,0547 | 0,1746 |
| β -pinene | 0,0291 | - | - | - | 0,0033 | 0,0059 |
| α -phellandrene | - | - | - | - | 0,0102 | 0,0077 |
| cymene | - | - | - | - | 0,0198 | 0,0672 |
| limonene | 0,1089 | 0,4629 | 0,5499 | 0,6303 | 0,0103 | 0,0163 |
| fenchol | 0,0440 | - | - | - | 0,0076 | 0,0399 |
| borneol | - | - | - | - | 0,0116 | 0,0459 |
| thymol | 0,2737 | - | - | - | 0,0089 | 0,0252 |
| myrtenal | 0,1271 | 0,2892 | 0,3147 | 0,3373 | 0,0353 | 0,0413 |
| verbenone | - | - | - | - | 0,2145 | 0,4551 |
| Total | 0,6969 | 0,7521 | 0,8646 | 0,9676 | 0,4588 | 1,0480 |

*st. odchylka od 0,0001 po 0,0141 pro jednotlivé látky



Obr. 6.126: Celkové množství terpenů v původních i termicky upravených vzorcích

6.4.2 Výsledky chemických změn jedlového dřeva během jeho stárnutí

Při stárnutí dřeva v suchých podmínkách nenastávají ve dřevě výrazné změny ani v průběhu dlouhého období. Z analýz jedlového dřeva (tab. 6.21) vyplývá, že k největším změnám dochází v případě extraktivních látek (4násobný nárůst) a hemicelulóz (pokles o 24%).

Tab. 6.21: Chemické charakteristiky vzorků jedlového dřeva (%)

| Vzorek | Extraktivní látky | Lignin | Celulóza | Holocelulóza | Hemicelulózy | C/L |
|--------|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------|------|
| A | 3,54 (0,30) | 28,24 (0,06) | 45,81 (0,43) | 72,59 (0,31) | 26,78 | 1,62 |
| B | 1,81 (0,23) | 28,93 (0,04) | 44,10 (0,21) | 73,70 (0,17) | 29,60 | 1,52 |
| C | 1,54 (0,17) | 29,61 (0,28) | 44,35 (0,08) | 74,51 (0,23) | 30,16 | 1,50 |
| D | 1,88 (0,15) | 29,36 (0,09) | 43,57 (0,34) | 76,60 (0,23) | 33,03 | 1,48 |
| E | 1,65 (0,22) | 29,66 (0,11) | 43,51 (0,20) | 76,61 (0,06) | 33,10 | 1,47 |
| F | 0,88 (0,13) | 29,51 (0,49) | 40,69 (0,32) | 75,88 (0,08) | 35,19 | 1,38 |

* C/L – poměr celulózy k ligninu; údaje v tabulkách vyjadřují standardní odchylku (S_x); hemicelulózy a C/L byly získány výpočtem, proto hodnoty S_x nejsou uvedené

Ve vzorcích jedlového dřeva (tab. 6.21) dochází v průběhu 390 let stárnutí k mírnému vzrůstu množství celulózy v důsledku rychlejší degradace hemicelulóz. Vzhledem k vysoké variabilitě obsahu hlavních složek dřeva, a to i ve stejných druzích, nemusí jejich množství vždy přesně vyjadřovat stupeň degradace. Spolehlivějším indikátorem se zdá být poměr celulózy k ligninu (C/L), [73]. Ve vzorcích jedlového dřeva poměr C/L vzrůstá lineárně s délkou stárnutí (tab. 6.21), což je způsobené vyšší stabilitou celulózy ve srovnání s ligninem při stárnutí jedlového dřeva za daných podmínek.

Lignin je během stárnutí dřeva jeho nejstabilnější složkou. Světlo, zejména ultrafialové záření a vzdušný kyslík, způsobuje změny v množství ligninu i v jeho struktuře. Tyto změny mohou způsobovat degradaci části ligninu při stárnutí jedlového dřeva (tab. 6.21). V jedlovém dřevě došlo v průběhu 390letého stárnutí k mírnému úbytku ligninu, pravděpodobně v důsledku oxidačních změn, které při jeho stanovení způsobily větší rozpustnost v kyselině.

V holocelulóze jehličnatých dřevin se nacházejí kromě celulózy také hemicelulózy typu arabino-4-O-metylglucuronoxylanu a O-acetyl-galaktoglucomananu [5]. Hlavním monosacharidem v holocelulóze jedlového dřeva je glukóza, jejíž množství vzrůstá v průběhu stárnutí, což je způsobené větší stabilitou celulózy ve srovnání s hemicelulózami (tab. 6.22). Během stárnutí jedlového dřeva dochází k rychlejší degradaci xylanu, naopak manan je stabilnější. Vzrůst celkového množství neutrálních sacharidů v holocelulóze může být způsobený deacetylací hemicelulóz a odbouráním kyselých složek polysacharidů, zejména urónových kyselin (tab. 6.22). Z neglukózových sacharidů k úbytku došlo v případě xylózy a galaktózy, naopak množství manózy v holocelulóze vzrostlo. Jednotlivé hemicelulózy jedlového dřeva mají během stárnutí různou stabilitu.

Tab. 6.22: Množství neutrálních monosacharidů ve vzorcích jedlového dřeva (%)

| Vzorek | GLC | XYL | GAL | ARA | MAN | SUMA |
|----------|-----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-------|
| A | 60,58 (0,35) | 3,10 (0,08) | 0,60 (0,09) | 0,97 (0,06) | 13,07 (0,57) | 78,32 |
| B | 56,68 (0,20) | 4,28 (0,05) | 0,92 (0,11) | 1,39 (0,08) | 13,50 (0,64) | 76,77 |
| C | 57,82 (0,81) | 3,61 (0,08) | 0,54 (0,04) | 1,52 (0,18) | 14,11 (0,73) | 77,59 |
| D | 56,27 (0,51) | 5,19 (0,38) | 0,68 (0,06) | 1,55 (0,10) | 13,64 (1,04) | 77,33 |
| E | 51,49 (1,97) | 4,30 (0,17) | 0,67 (0,03) | 1,76 (0,07) | 12,66 (0,07) | 70,88 |
| F | 53,94 (0,45) | 4,92 (0,11) | 3,88 (0,07) | 1,35 (0,07) | 9,709 (0,07) | 73,80 |

* údaje v tabulkách vyjadřují směrodatnou odchylku (S_x)

V jedlovém dřevě byly zjištěny tyto hemicelulózy: arabino-4-O-metylglucuronoxylan (10:14:76), vodorozpustný galaktoglucomanan (1:1:3) a galaktoglucomanan (0,1:1:3) rozpustný v alkáliích [74]. Hlavními sacharidy v jedlovém dřevě jsou manóza, glukóza a xylóza, v menší míře se vyskytují i galaktóza a arabinóza. Z hemicelulóz jedlového dřeva je v 5% KOH rozpustný zejména arabino-glucuronoxylan, v menší míře i galaktoglucomanan (tab. 6.23). V průběhu stárnutí dřeva dochází v jednotlivých hemicelulózách k rozdílným změnám. Nastává relativní pokles arabinózy a xylózy, množství galaktózy, manózy a glukózy vzrůstá, z čehož vyplývá, že arabinoglucuronoxylan je vůči stárnutí méně odolný než galaktoglucomanan a rychleji se degraduje.

Výsledky

V 24% KOH se z jedlového dřeva extrahují ve větší míře hemicelulózy typu galaktoglucomananu, méně je zastoupený arabinoglucuronoxylan (tab. 6.23). Odolnost vůči stárnutí není tak jednoznačná jako v předchozím případě (dochází k poklesu manózy a galaktózy, vzrůstu arabinózy a glukózy), což může souviset s rozdílnou přístupností hůře extrahovatelných hemicelulóz vůči vnějším podmínkám (vzduch, světlo atd.).

Tab. 6.23: Relativní zastoupení neutrálních monosacharidů v jednotlivých frakcích hemicelulóz izolovaných z holocelulózy jedlového dřeva (%)

| Rozpustné v 5% KOH | GLC | XYL | GAL | ARA | MAN |
|------------------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|
| A | 13,39 (0,05) | 38,32 (0,03) | 6,51 (0,74) | 9,73 (1,19) | 32,05 (0,28) |
| B | 9,15 (0,37) | 47,96 (2,30) | 7,15 (0,75) | 13,83 (1,92) | 21,92 (1,34) |
| C | 10,77 (0,06) | 40,93 (0,35) | 4,66 (0,02) | 13,98 (0,58) | 29,66 (0,17) |
| D | 6,20 (0,01) | 54,87 (0,04) | 4,18 (0,08) | 18,54 (0,18) | 16,22 (0,05) |
| E | 8,13 (0,51) | 50,35 (0,99) | 4,66 (0,42) | 16,10 (0,21) | 20,76 (0,15) |
| F | 10,30 (0,06) | 57,49 (0,03) | 4,28 (0,05) | 16,99 (0,32) | 10,93 (0,18) |
| Rozpustné v 24% KOH | GLC | XYL | GAL | ARA | MAN |
| A | 17,41 (0,23) | 20,17 (0,46) | 3,37 (0,06) | 23,64 (0,21) | 35,42 (0,54) |
| B | 10,40 (0,27) | 25,47 (1,06) | 2,54 (0,24) | 19,64 (1,71) | 41,96 (3,28) |
| C | 10,89 (0,28) | 24,64 (0,03) | 2,01 (0,04) | 18,89 (0,66) | 43,57 (0,80) |
| D | 9,89 (0,15) | 25,66 (0,09) | 2,21 (0,06) | 17,05 (0,17) | 45,18 (0,18) |
| E | 9,67 (0,71) | 26,86 (2,12) | 2,45 (0,14) | 15,12 (1,46) | 45,89 (0,05) |
| F | 9,77 (0,92) | 22,52 (0,81) | 5,14 (0,29) | 12,40 (1,10) | 50,17 (1,78) |

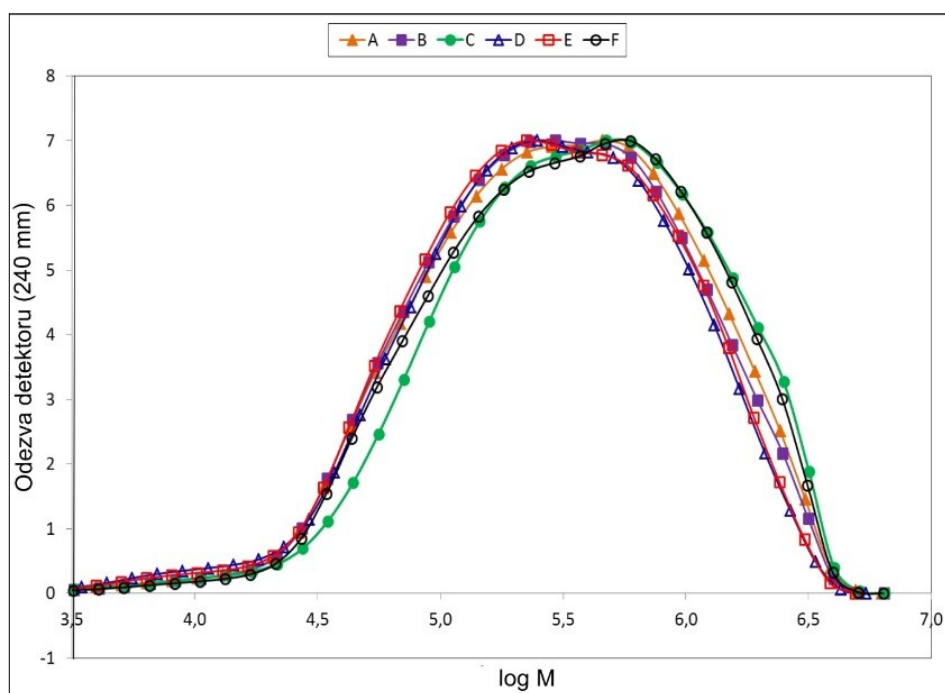
*údaje v tabulkách vyjadřují směrodatnou odchylku (S_x)

Dále byl sledován významný faktor ovlivňující pevnostní vlastnosti dřeva, a to polymerizační stupeň a distribuce molových hmotností celulózy. V průběhu 390letého stárnutí jedlového dřeva nebyly v hodnotách polymerizačních stupňů ani polydisperzity (tab. 6.24), ani v distribuci molových hmotností (obr. 6.127) pozorovány významné změny.

Tab. 6.24: Molekulové hmotnosti ($\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$) a polydisperzita vzorků celulózy jedlového dřeva (M_n = číselná m.h., M_w = hmotnostní m.h., M_z = z-tová m.h., PD (polydisperzita) = M_w/M_n)

| | Mn | Mw | Mz | PD | DPw |
|---|--------------|---------------|----------------|------|------|
| A | 42615 (923) | 195132 (8025) | 438223 (35025) | 4,58 | 1205 |
| B | 45383 (989) | 185024 (7892) | 418832 (34587) | 4,08 | 1142 |
| C | 50566 (1002) | 225604 (9035) | 478157 (37884) | 4,46 | 1393 |
| D | 39220 (828) | 170382 (7758) | 380236 (33689) | 4,34 | 1052 |
| E | 40220 (928) | 170767 (7589) | 379704 (32689) | 4,25 | 1054 |
| F | 50655 (1105) | 212836 (8987) | 456110 (37587) | 4,20 | 1314 |

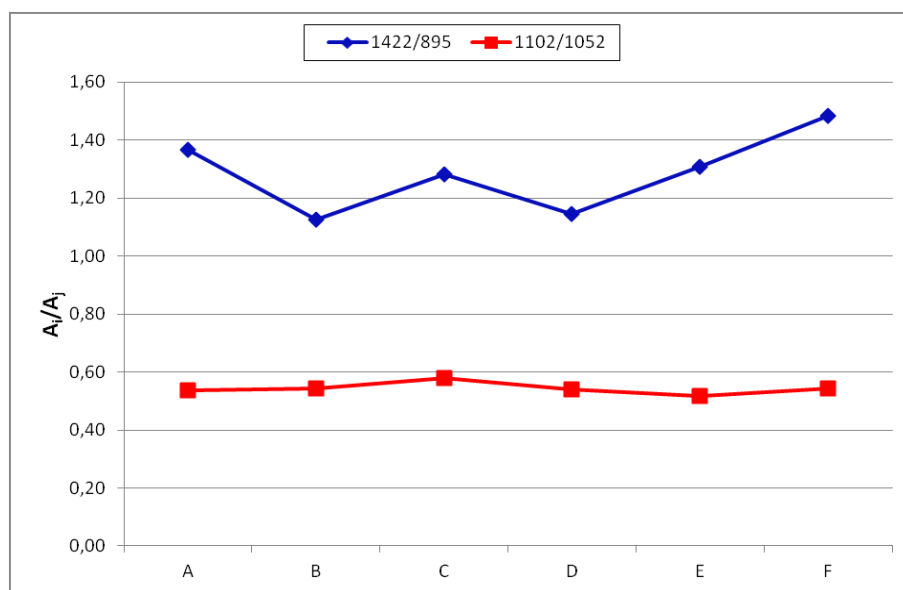
* DPw = $M_w/162$, údaje v závorkách vyjadřují směrodatnou odchylku (S_x). Hodnoty PD a DPw byly vypočítány, pro hodnoty S_x nejsou uvedeny



Obr. 6.127: Distribuce molových hmotností trikarbanilátů celulózy jedlového dřeva

Vysoký podíl krystalinity celulózy je zapříčiněn vysokou uspořádaností celulóзовých makromolekul do mikrofibril v důsledku existence intermolekulových vodíkových vazeb. Stupeň krystalinity má vliv na mechanické, fyzikální i chemické vlastnosti dřeva. Při jeho určení se používá řada metod (jádrová magnetická rezonance – NMR, rentgenografie – RTG a infračervená spektroskopie – FT-IR), mezi jejich výsledky byla zjištěná dobrá korelace (1-3). Pro určení stupně krystalinity metodou FT-IR se nejčastěji používají poměry absorbancí při vlnočtech 1422/895 a 1102/1052 (2-3).

Z výsledků na obr. 6.128 vyplývá, že stárnutí dřeva v analyzovaných vzorcích nemělo vliv na změny krystalického podílu, z čehož plyne, že mechanické vlastnosti dřeva by se neměly výrazně měnit vlivem věku vzorků ve sledovaném rozsahu (do 400 let), i když při dlouhodobém stárnutí dřeva (8100 let) byl pozorovaný mírný vzrůst krystalinity celulózy [98].



Obr. 6.128: Změny krystalinity celulózy ve vzorcích jedlového dřeva naměřené metodou infračervené spektroskopie (FT-IR)

Hemicelulózy, které byly extrahovány z holocelulózy jedlového dřeva 5procentním roztokem a 24procentním roztokem KOH, podléhaly v průběhu stárnutí rozdílným změnám. V případě frakce, která se extrahovala 5% roztokem KOH, dochází k lineárnímu poklesu molových hmotností (M_w , DP_w) s věkem stárnutí (tab. 6.25),

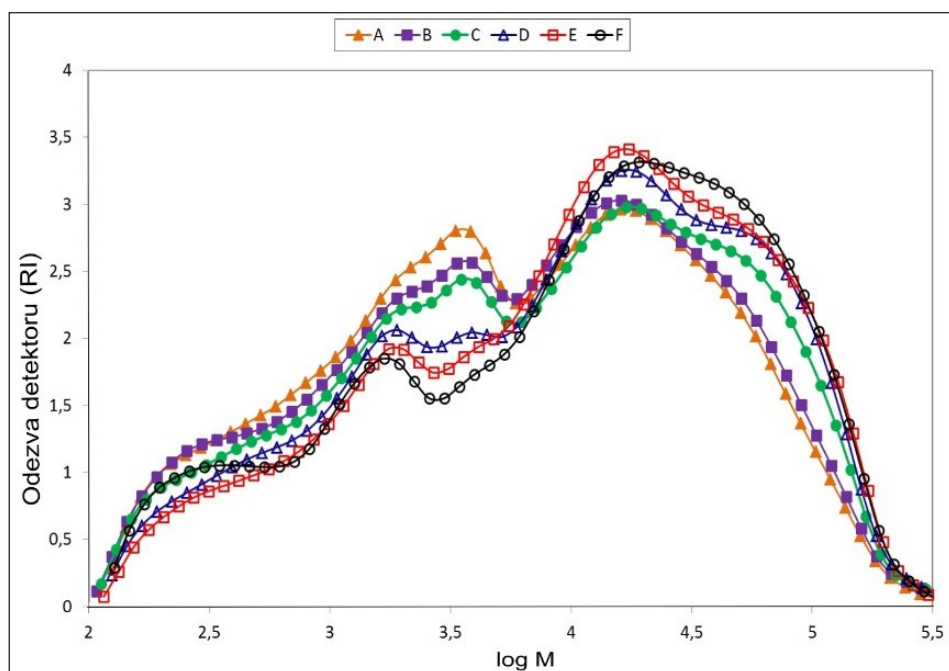
změny polydisperzity však nevykazují jednoznačný trend, což je způsobené rozdílným štěpením glykozidových vazeb v této frakci hemicelulóz. Z grafů distribuce molových hmotností (obr. 6.129) je zřejmé, že dochází k degradaci vysoce molekulových podílů v závislosti na věku, což výrazně ovlivňuje výsledné hodnoty M_w a DP_w ; vzrůstají podíly se středními hodnotami molových hmotností, které se potom různou rychlostí štěpí do kratších řetězců. Jejich množství výrazně ovlivňuje hodnoty M_n a tím také hodnoty polydisperzity PD .

Frakce hemicelulóz, která byla extrahovaná 24% roztokem KOH, je odolnější vůči stárnutí a výrazný pokles hodnot molových hmotností byl pozorován až při nejstarším vzorku (tab. 6.25). Polydisperzita mírně klesala s dobou stárnutí vzorků. Grafy distribuce molových hmotností mají bimodální charakter (obr. 6.130), přičemž dochází ke zřetelnému poklesu vysoce molekulových podílů a ke vzrůstu nízko molekulových podílů v nejstarším vzorku (vzorek A).

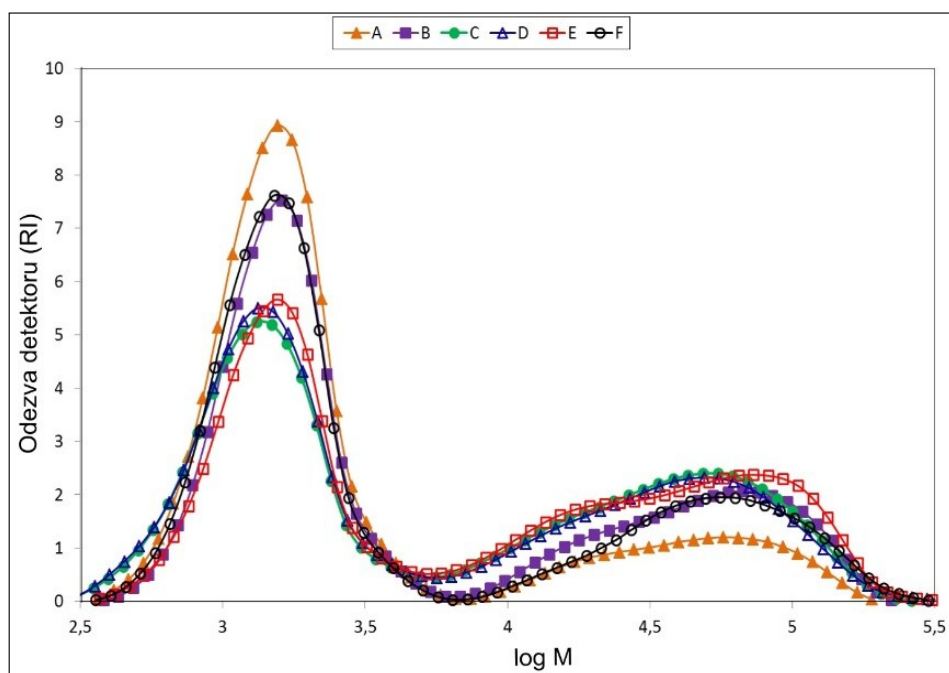
Tab. 6.25: Molekulové hmotnosti ($g \cdot mol^{-1}$) a polydisperzita vzorků hemicelulóz izolovaných z holocelulózy jedlového dřeva (M_n = číselná m.h., M_w = hmotnostní m.h., M_z = z-tová m.h., PD (polydisperzita) = M_w/M_n)

| Rozpustné v 5% KOH | M_n | M_w | M_z | PD | DP_w |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|
| A | 1924 | 24872 | 80461 | 12,96 | 159 |
| B | 2056 | 26595 | 82749 | 12,94 | 172 |
| C | 2258 | 31383 | 92678 | 13,90 | 202 |
| D | 2745 | 34285 | 91101 | 12,50 | 224 |
| E | 2933 | 34968 | 91164 | 11,93 | 227 |
| F | 2743 | 35376 | 90031 | 12,92 | 231 |
| Rozpustné v 24% KOH | M_n | M_w | M_z | PD | DP_w |
| A | 1875 | 16922 | 76694 | 9,03 | 108 |
| B | 2468 | 28677 | 87756 | 11,62 | 183 |
| C | 2469 | 29458 | 84258 | 11,93 | 188 |
| D | 3031 | 34553 | 92004 | 12,50 | 220 |
| E | 3049 | 34699 | 92106 | 11,38 | 221 |
| F | 2256 | 29020 | 97244 | 12,86 | 184 |

* hodnoty DP_w byly získány jako podíl M_w a relativního poměru pentóz a hexóz v jednotlivých vzorcích



Obr. 6.129: Distribuce molových hmotností hemiceululóz jedlového dřeva, které byly extrahované 5% KOH



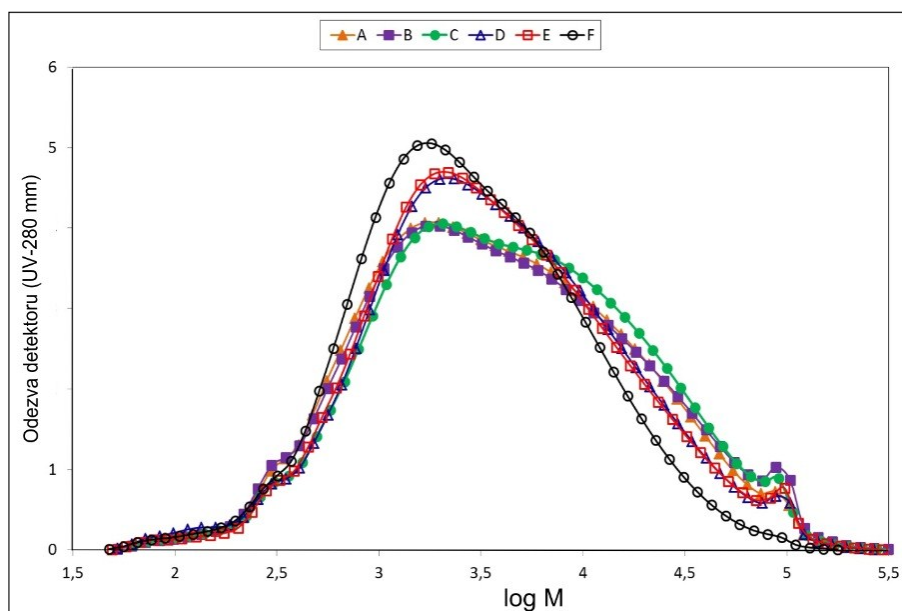
Obr. 6.130: Distribuce molových hmotností hemiceululóz jedlového dřeva, které byly extrahované 24% KOH

Ve dřevě se nacházejí dvě hlavní formy ligninu – guajacylový a syringylový. Z výsledků gelové permeační chromatografie (tab. 6.26) vyplývá, že během stárnutí jedlového dřeva dochází ve vzorku B ke zvyšování jeho molové hmotnosti v důsledku kondenzace, a to až téměř dvojnásobně (M_w), resp. o 19% (M_n), než ke zvyšování polydisperzity o 66%. V nejstarším vzorku (A) lze pozorovat mírný pokles všech hodnot. Během stárnutí dřeva dochází v ligninu jedlového dřeva zejména ke kondenzačním reakcím, jak to lze pozorovat také na křivkách distribuce molekulových hmotností (obr. 6.131).

Tab. 6.26: Molekulové hmotnosti ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$) a polydisperzita vzorků dioxanových ligninů jedlového dřeva (M_n = číselná m.h., M_w = hmotnostní m.h., M_z = z-tová m.h., PD (polydisperzita) = M_w/M_n)

| | M_n | M_w | M_z | PD |
|----------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------|
| A | 1864 (12) | 12843 (172) | 47377 (1330) | 6,89 |
| B | 1921 (12) | 14572 (74) | 54940 (1134) | 7,59 |
| C | 2067 (58) | 14028 (126) | 48397 (1133) | 6,79 |
| D | 1876 (10) | 11839 (98) | 46481 (723) | 6,32 |
| E | 1959 (24) | 12075 (172) | 49193 (1396) | 6,17 |
| F | 1614 (22) | 7375 (142) | 26786 (1224) | 4,57 |

* údaje v tabulkách vyjadřují směrodatnou odchylku (S_x)



Obr. 6.131: Distribuce molových hmotností dioxanových ligninů u jedlového dřeva

6.5 Mechanické vlastnosti dřeva

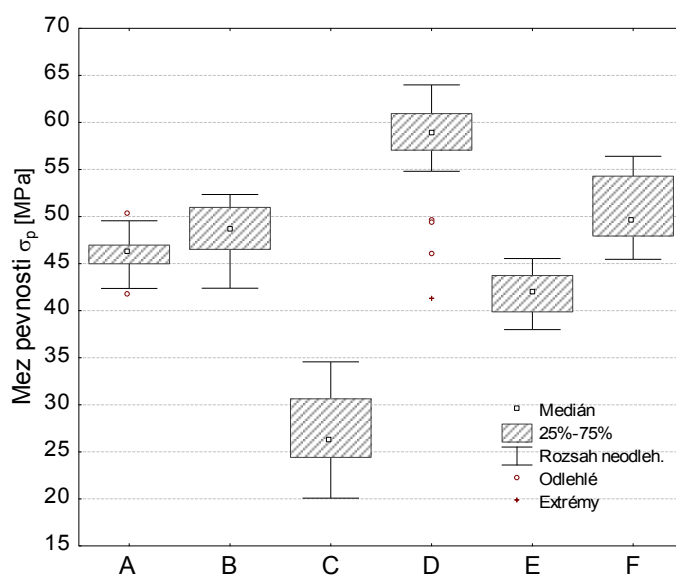
6.5.1 Pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny

Při zatížení tělesa v tlaku působí síla kolmo na plochu v ose tělesa a je orientovaná tak, že dochází ke stlačení tělesa ve směru zatížení (ve směru vláken), obr. 5.13a a 5.13b. V tab. 6.27 jsou uvedeny průměrné hodnoty meze pevnosti v tlaku ve směru vláken spolu s dalšími statistickými charakteristikami všech šesti výběrových souborů. Grafické znázornění výsledků meze pevnosti je na obr. 6.132.

Výsledky jednofaktorové analýzy rozptylu potvrdily, že existuje významný rozdíl v pevnosti jednotlivých výběrových souborů na nejvyšší hladině významnosti (99,9 %). Na základě těchto výsledků jsme uskutečnili Duncanův test pro testování významnosti rozdílů výběrových průměrů. Výsledky testu jsou uvedeny v tab. 6.28. Výsledky Duncanova testu potvrdily, že všechny průměrné pevnosti v tlaku rovnoběžně s vlákny výběrových souborů A-F se mezi sebou významně odlišují.

Tab. 6.27: Základní statistické charakteristiky pevnosti jedlového dřeva v tlaku rovnoběžně s vlákny

| Soubor | Počet měření | Aritmetický průměr | Std. dev. | Std. err | -95,00 % | +95,00 % |
|--------|--------------|--------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | N | σ [MPa] | σ [MPa] | σ [MPa] | σ [MPa] | σ [MPa] |
| | 167 | 45,3 | 10,3 | 0,8 | 43,7 | 46,9 |
| A | 28 | 45,8 | 2,0 | 0,4 | 45,0 | 46,6 |
| B | 26 | 48,4 | 2,7 | 0,5 | 47,3 | 49,5 |
| C | 28 | 26,9 | 4,1 | 0,8 | 25,3 | 28,5 |
| D | 29 | 57,6 | 5,2 | 1,0 | 55,6 | 59,6 |
| E | 27 | 41,8 | 2,2 | 0,4 | 40,8 | 42,6 |
| F | 29 | 50,8 | 3,5 | 0,6 | 49,5 | 52,1 |



Obr. 6.132: Pevnost v tlaku ve směru vláken jedlového dřeva jednotlivých výběrových souborů

Tab. 6.28: Výsledky Duncanova testu – pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny

| | A | B | C | D | E | F |
|----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | 45,8 | 48,4 | 26,9 | 57,6 | 41,8 | 50,8 |
| A | | 0,005570 | 0,000011 | 0,000003 | 0,000026 | 0,000011 |
| B | 0,005570 | | 0,000003 | 0,000011 | 0,000011 | 0,011639 |
| C | 0,000011 | 0,000003 | | 0,000004 | 0,000009 | 0,000004 |
| D | 0,000003 | 0,000011 | 0,000004 | | 0,000004 | 0,000009 |
| E | 0,000026 | 0,000011 | 0,000009 | 0,000004 | | 0,000003 |
| F | 0,000011 | 0,011639 | 0,000004 | 0,000009 | 0,000003 | |

Pokud soubory s hodnotami pevnosti uspořádáme v pořadí od nejnižší pevnosti po nejvyšší, dostaneme následovné pořadí souborů:

$$C < E < A < B < F < D.$$

Kdyby měl na hodnoty pevnosti vliv jen samotný faktor času, pak by pořadí souborů bylo následovné:

$$A < B < C < D < E < F.$$

Výsledky Duncanova testu potvrdily, že na pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny nemá rozhodující vliv stáří jedlového dřeva. Prokázalo se, že hlavní vliv na pevnost dřeva měly dva faktory – degradace dřeva tesaříkem krovovým a hustota. V řadě těles bylo pozorováno narušení dřeva tesaříkem. Nejvýraznější to pak bylo v případě souboru „C“, což bylo také hlavním důvodem, proč byla pevnost tohoto souboru nejnižší.

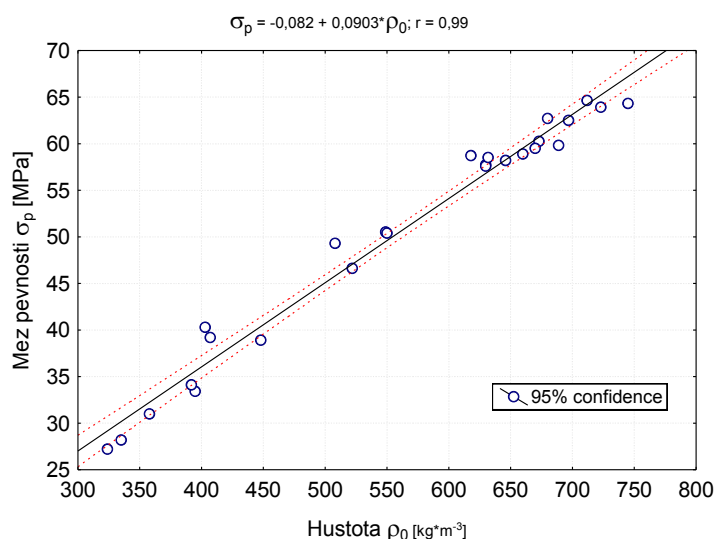
Rozdíly pevnosti dřeva v tlaku rovnoběžně s vlákny mezi jednotlivými soubory byly zapříčiněny rozdílnou strukturou na úrovni makro- a mikrostruktury (juvenilní dřevo, reakční dřevo, rozdílný podíl letního a jarního dřeva atd.). Tyto rozdíly ve struktuře byly vyjádřeny prostřednictvím jeho hustoty. S cílem získat co nejobektivnější výsledek je uváděna závislost meze pevnosti v tlaku rovnoběžně s vlákny na hustotě dřeva, která byla stanovená z výsledků několika autorů [75, 76, 77, 78, 2]. Z průměrných hodnot pevnosti a hustoty 18 druhů roztroušeně-pórovitého a kruhovitě-pórovitého dřeva listnatých, jakož i dřeva jehličnatých dřevin z 26 výběrových souborů byla zjištěná lineární závislost meze pevnosti rovnoběžně s vlákny na hustotě (obr. 6.133).

Jak je patrné z obr. 6.133, mez pevnosti dřeva v tlaku rovnoběžně s vlákny roste úměrně s jeho hustotou, nezávisle na druhu dřeva. Velmi těsnou korelaci potvrzuje také vysoký korelační koeficient. Na základě dosažených výsledků bylo dle autorů možné konstatovat, že průměrná pevnost dřeva, nehledě na druh, závisí z 98 % na jeho hustotě. Na základě testování regresních parametrů lineární rovnice (obr. 6.133) bylo možné dle Kúdeli [78] tuto rovnici zjednodušit na tvar:

$$\sigma_p = 0,09 \cdot \rho_0 \quad (6.1)$$

kde: σ_p ...mez pevnosti
 ρ_0 ...hustota při vlhkosti 0 %

Rovnici (6.1) je možné považovat za dostatečně přesnou pro stanovení pevnosti libovolného druhu dřeva v rozsahu hustoty 300–800 kg·m⁻³. Při takto stanovené pevnosti dřeva není možné dosáhnout větší chyby, než je standardní chyba průměru dané dřeviny.



Obr. 6.133: Závislost meze pevnosti dřeva v tlaku rovnoběžně s vlákny na hustotě (lineární závislost byla stanovena z průměrných hodnot 18 druhů dřeva), [78]

Hustota zkušebních těles při 12% vlhkosti, stejně jako i při vlhkosti 0 %, se v našem případě mezi soubory významně lišila (tab. 6.29). Nejnižší průměrnou hodnotu hustoty měl soubor C a nejvyšší soubor D. Průměrné hodnoty hustoty jednotlivých výběrových souborů byly v intervalu 300–650 kg·m⁻³ (tab. 6.30, obr. 6.134). V případě hustoty platí téměř stejná nerovnost jako v případě pevnosti v tlaku:

$$C < E < B < A < F < D.$$

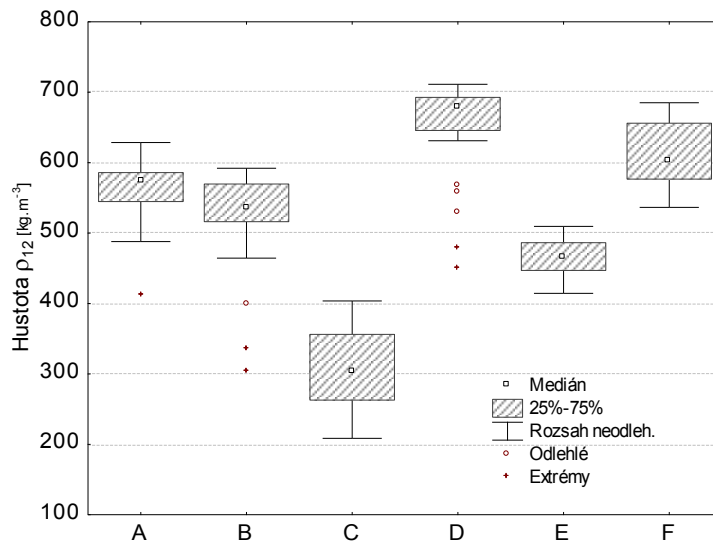
Tlaková pevnost dřeva je v těsné korelaci s hustotou a mění se v souladu s rovnicí (6.1). Platí to také pro soubory těles napadených tesaříkem. Pokles pevnosti v souboru C v důsledku významného poškození tesaříkem lze vysvětlit tím, že poklesla hustota těchto těles. Kromě snížení hustoty a pevnosti v souboru C se obě veličiny vyznačují významně zvýšenou variabilitou.

Tab. 6.29: Základní statistické charakteristiky hustoty jedlového dřeva ρ_{12}

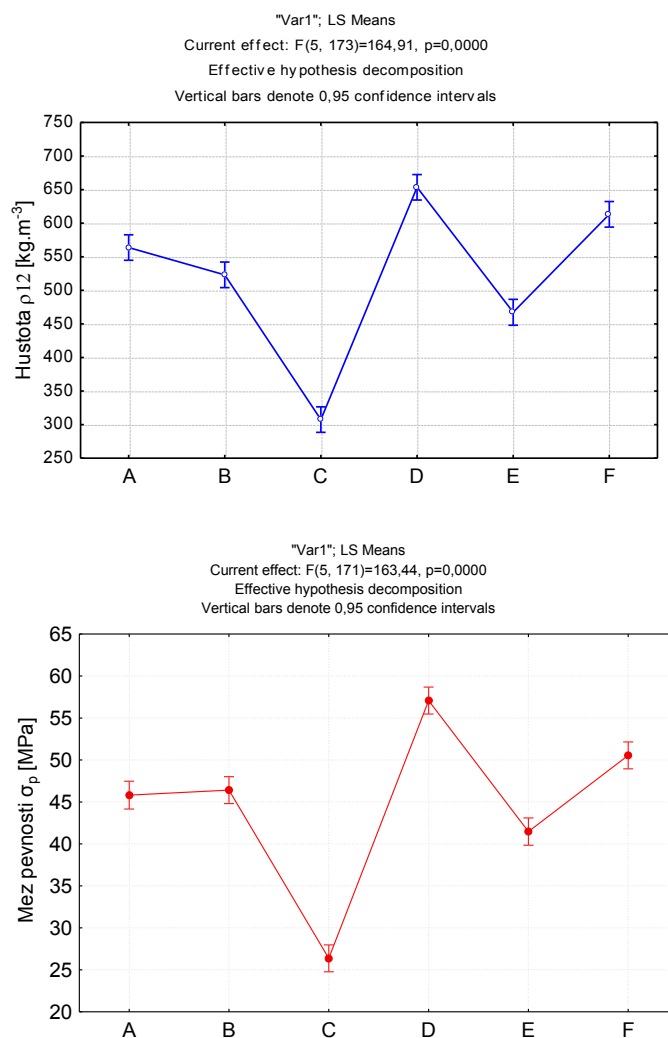
| Soubor | Počet měření N | Aritmetický průměr | | Std. dev. | Std. err | -95,00 % | +95,00 % |
|--------|-------------------|-----------------------|----------|-----------|----------|----------|----------|
| | | ρ_{12} | ρ_0 | | | | |
| | | [kg·m ⁻³] | | | | | |
| | 179 | 521,7 | 492,9 | 124,7 | 9,3 | 503,3 | 540,1 |
| A | 30 | 563,7 | 530,2 | 41,3 | 7,5 | 548,3 | 579,2 |
| B | 30 | 523,1 | 494,2 | 70,2 | 12,8 | 496,8 | 549,3 |
| C | 30 | 307,5 | 298,2 | 52,5 | 9,5 | 287,8 | 327,1 |
| D | 30 | 653,4 | 608,9 | 67,8 | 12,4 | 628,1 | 678,8 |
| E | 29 | 467,3 | 444,1 | 25,2 | 4,7 | 457,7 | 476,9 |
| F | 30 | 613,2 | 573,8 | 43,9 | 8,0 | 596,8 | 629,6 |

Tab. 6.30: Výsledky Duncanova testu – hustota

| | A 563,7 | B 523,1 | C 307,5 | D 653,4 | E 467,3 | F 613,2 |
|---|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| A | | 0,002881 | 0,000003 | 0,000011 | 0,000011 | 0,000292 |
| B | 0,002881 | | 0,000011 | 0,000003 | 0,000051 | 0,000011 |
| C | 0,000003 | 0,000011 | | 0,000004 | 0,000009 | 0,000004 |
| D | 0,000011 | 0,000003 | 0,000004 | | 0,000004 | 0,003165 |
| E | 0,000011 | 0,000051 | 0,000009 | 0,000004 | | 0,000003 |
| F | 0,000292 | 0,000011 | 0,000004 | 0,003165 | 0,000003 | |

Obr. 6.134: Hustota jedlového dřeva ρ_{12} v jednotlivých výběrových souborech

Jak pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny „kopíruje“ hustotu, je patrné také z obr. 6.135.



Obr. 6.135: Průměrné hodnoty hustoty a pevnosti v tlaku rovnoběžně s vlákny jedlového dřeva

6.5.2 Pevnost v tahu rovnoběžně s vlákny

Při zatížení tělesa v tahu působí síla kolmo na plochu v ose tělesa a je orientovaná tak, že dochází k roztahování tělesa ve směru zatížení (ve směru vláken), obr. 5.14a a 5.14b. Výsledky pevnosti v tahu jsou uvedeny v tab. 6.30. Grafické znázornění výsledků meze pevnosti je na obr. 6.136 a 6.137.

Výsledky jednofaktorové analýzy rozptylu opět potvrdily, že existuje významný rozdíl pevnosti v tahu jednotlivých výběrových souborů na nejvyšší hladině významnosti (99,9 %). Na základě těchto výsledků jsme pro testování významnosti rozdílů výběrových průměrů použili Duncanův test. Výsledky testu jsou uvedeny v tab. 6.31. Výsledky Duncanova testu potvrdily, že ve srovnání s ostatními soubory byla průměrná pevnost významně nižší pouze u souboru C. Uvedené napadení dřeva tesaříkem se na poklesu pevnosti v tahu rovnoběžně s vlákny u tohoto souboru projevilo výrazně. Pokles pevnosti už nelze odůvodnit jen poklesem hustoty. Vysoká variabilita meze pevnosti v rámci souboru C (téměř 70 %) taktéž signalizuje nesourodost materiálu. Mezi ostatními pěti soubory se nepotvrdil statisticky významný rozdíl. U těchto souborů byla variabilita nižší (kolem 30–36 %), ale ve srovnání s literaturou byla zvýšená. Významnou měrou se pod tuto variabilitu podepsala také samotná kvalita přípravy těles (výskyt suků, šikmý průběh vláken, v důsledku čehož bylo nutné několik těles vyřadit). Pokud uspořádáme soubory podle velikosti hodnot pevnosti v tahu rovnoběžně s vlákny, pak platí následující pořadí:

$$C < (A \cong B \cong E \cong F \cong D).$$

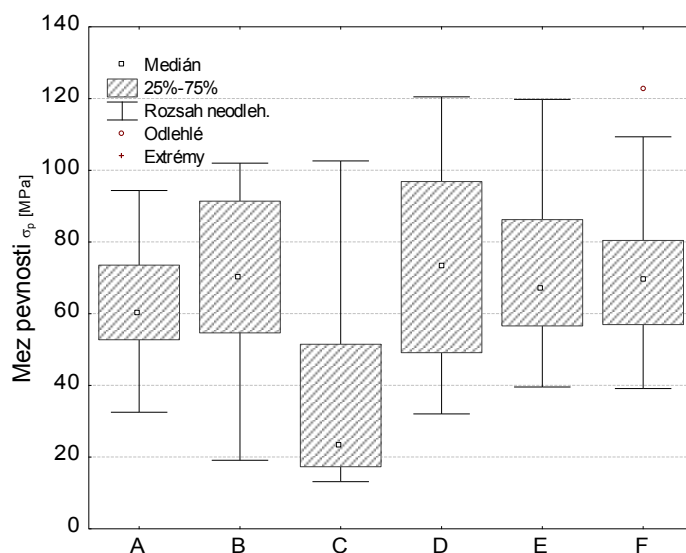
Opět neplatí pořadí

$$A < B < C < D < E < F.$$

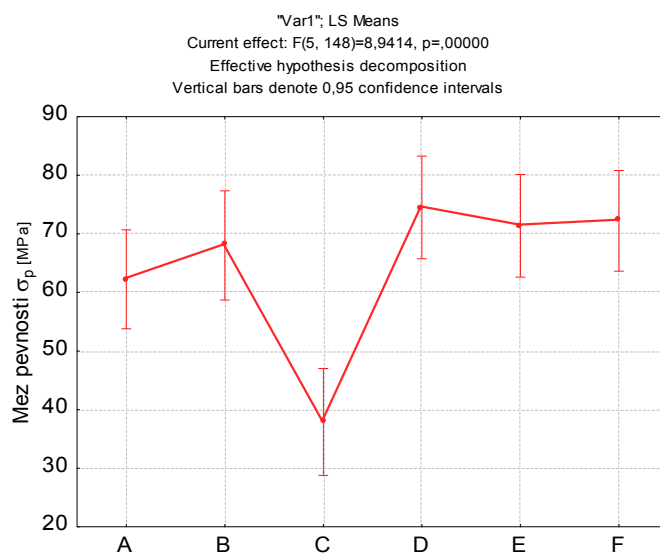
Výsledek pevnosti v tahu rovnoběžně s vlákny nezávisí na stáří dřeva, ale v první řadě na jeho zdravotním stavu, který nemusí být u staršího dřeva zákonitě horší než u dřeva mladšího.

Tab. 6.30: Základní statistické charakteristiky pevnosti jedlového dřeva v tahu rovnoběžně s vlákny

| Faktor | Počet měření | Průměr | Std.dev. | Std.err | -95,00 % | +95,00 % |
|--------|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | N | σ [MPa] | σ [MPa] | σ [MPa] | σ [MPa] | σ [MPa] |
| | 154 | 64,7 | 25,4 | 2,04 | 60,6 | 68,7 |
| A | 28 | 62,2 | 14,1 | 2,7 | 56,7 | 67,7 |
| B | 23 | 68,0 | 24,8 | 5,2 | 57,3 | 78,7 |
| C | 24 | 37,9 | 26,1 | 5,3 | 26,9 | 48,9 |
| D | 26 | 74,5 | 26,81 | 5,3 | 63,7 | 85,3 |
| E | 26 | 71,4 | 21,4 | 4,2 | 62,7 | 80,0 |
| F | 27 | 72,2 | 21,4 | 4,1 | 63,9 | 80,6 |



Obr. 6.136: Pevnost v tahu ve směru vláken jedlového dřeva u jednotlivých výběrových souborů



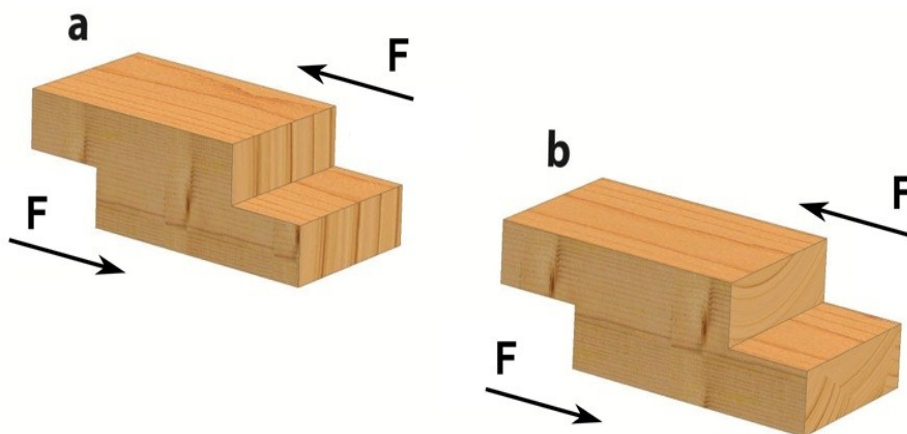
Obr. 6.137: Průměrné hodnoty pevnosti v tahu jedlového dřeva rovnoběžně s vlákny

Tab. 6.31: Výsledky Duncanova testu – tah rovnoběžně s vlákny

| | A 62,2 | B 68,0 | C 37,9 | D 74,5 | E 71,4 | F 72,2 |
|---|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| A | | 0,360010 | 0,000126 | 0,084106 | 0,174029 | 0,152130 |
| B | 0,360010 | | 0,000013 | 0,357896 | 0,596280 | 0,535718 |
| C | 0,000126 | 0,000013 | | 0,000004 | 0,000003 | 0,000004 |
| D | 0,084106 | 0,357896 | 0,000004 | | 0,645004 | 0,718655 |
| E | 0,174029 | 0,596280 | 0,000003 | 0,645004 | | 0,893299 |
| F | 0,152130 | 0,535718 | 0,000004 | 0,718655 | 0,893299 | |

6.5.3 Pevnost ve smyku

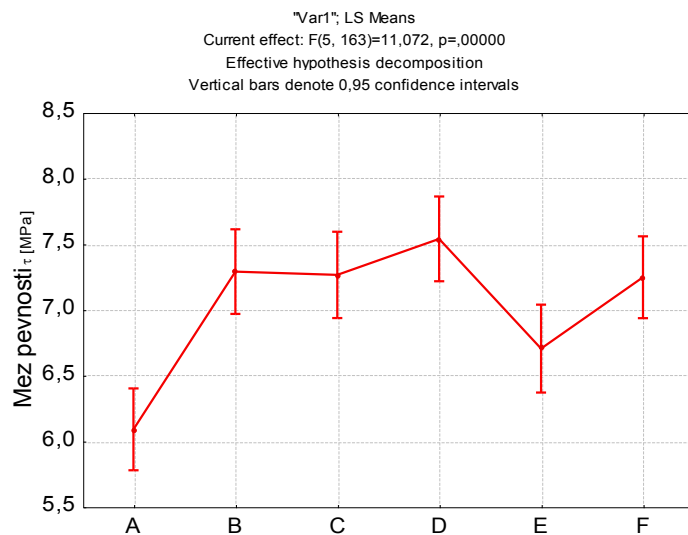
Při namáhání ve smyku působí síly proti sobě, ale jsou posunuté (obr. 5.15a a 5.15b). Deformace tělesa se projevuje posunutím vrstev. Při zatížení ve smyku je potřebné kromě směru zohledňovat také rovinu porušení. Při smyku rovnoběžně s vlákny je to radiální, resp. tangenciální rovina (obr. 6.138). Protože v případě jedlového dřeva se nepotvrdil statisticky významný rozdíl mezi radiální a tangenciální rovinou [2, 79], budeme hovořit jen o pevnosti ve smyku rovnoběžně s vlákny. Experimentální výsledky jsou uvedeny v tab. 6.32 a znázorněny také na obr. 6.139 a 6.140.



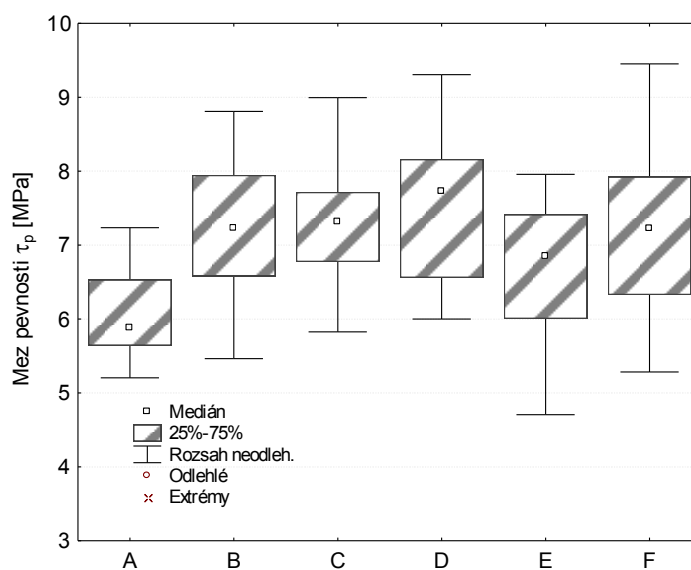
Obr. 6.138: Schematické znázornění zatížení ve smyku rovnoběžně s vlákny, a) radiální rovina, b) tangenciální rovina

Tab. 6.32: Základní statistické charakteristiky pevnosti jedlového dřeva v tlaku rovnoběžně s vlákny

| Faktor | Počet měření | Průměr | Std.dev. | Std.err | −95,00 % | +95,00 % |
|--------|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | N | σ [MPa] | σ [MPa] | σ [MPa] | σ [MPa] | σ [MPa] |
| | 169 | 7,01 | 0,98 | 0,075 | 6,86 | 7,16 |
| A | 30 | 6,09 | 0,55 | 10 | 5,88 | 6,29 |
| B | 28 | 7,29 | 0,87 | 0,16 | 6,95 | 7,62 |
| C | 27 | 7,26 | 0,72 | 0,14 | 6,98 | 7,55 |
| D | 28 | 7,54 | 1,01 | 0,19 | 7,14 | 7,93 |
| E | 26 | 6,70 | 0,88 | 0,17 | 6,35 | 7,06 |
| F | 30 | 7,24 | 1,05 | 0,19 | 6,85 | 7,64 |



Obr. 6.139: Průměrná pevnost ve smyku ve směru vláken jedlového dřeva jednotlivých výběrových souborů



Obr. 6.140: Pevnost ve smyku jedlového dřeva ve směru vláken jednotlivých výběrových souborů

Výsledky jednofaktorové analýzy opět potvrdily statisticky významné rozdíly pevnosti ve smyku mezi jednotlivými soubory. Na základě Duncanova testu (tab. 6.33) můžeme podle velikosti smykové pevnosti udělat následné pořadí:

$$(A < E) < (B \cong C \cong D \cong F).$$

V tomto případě měl nejnižší průměrnou pevnost soubor A (nejstarší dřevo), ale druhý v pořadí byl soubor E. Pevnost ve smyku ostatních souborů se statisticky významně nelišila, i když Duncanův test potvrdil nižší průměrnou pevnost ve smyku souborů A a E, z praktického hlediska jsou tyto rozdíly malé.

Tab. 6.33: Výsledky Duncanova testu – smyk

| | A 6,09 | B 7,29 | C 7,26 | D 7,54 | E 6,70 | F 7,24 |
|----------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| A | | 0,000005 | 0,000003 | 0,000004 | 0,007683 | 0,000012 |
| B | 0,000005 | | 0,914026 | 0,279526 | 0,018285 | 0,862386 |
| C | 0,000003 | 0,914026 | | 0,264817 | 0,020070 | 0,937597 |
| D | 0,000004 | 0,279526 | 0,264817 | | 0,000682 | 0,253265 |
| E | 0,007683 | 0,018285 | 0,020070 | 0,000682 | | 0,018550 |
| F | 0,000012 | 0,862386 | 0,937597 | 0,253265 | 0,018550 | |

6.5.4 Pevnost dřeva ve statickém ohybu

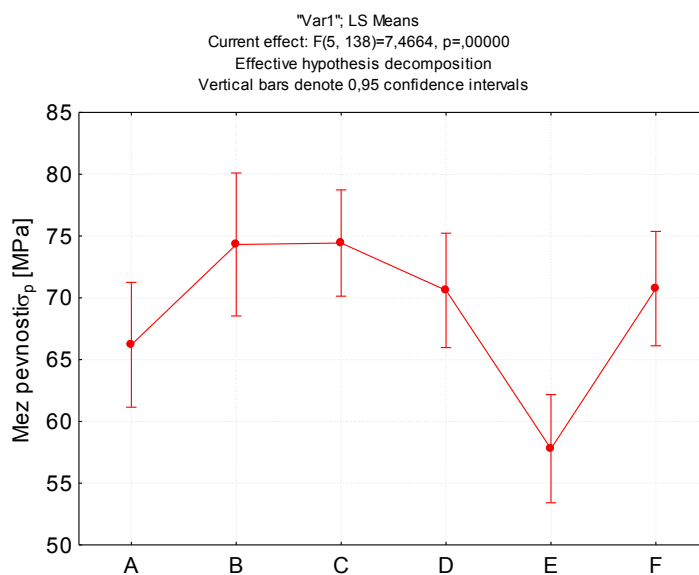
Namáhání v ohybu vzniká v průřezu tělesa zatíženého dvojicí sil působících v rovině přecházející podélnou osou tělesa (obr. 5.16a a 5.16b). Je to kombinace tahového a tlakového namáhání. Vzniklý ohybový moment způsobuje průhyb tělesa. Přibližně v jedné polovině průřezu vzniká tlak a ve druhé tah. Mezi těmito dvěma oblastmi namáhání je neutrální vrstva. Pokud jsou moduly pružnosti v tlaku a v tahu stejné, neutrální osa je totožná s geometrickou osou tělesa.

Výsledky

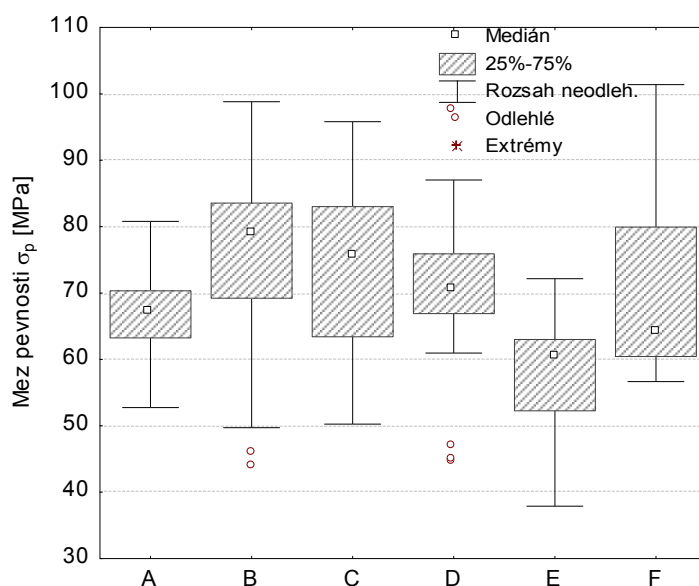
Dosažené výsledky meze pevnosti ve statickém ohybu jedlového dřeva všech šesti souborů jsou uvedeny v tab. 6.34 a na obr. 6.141 a 6.142. Průměrné hodnoty pevnosti se pohybovaly od 66 MPa do 74,5 MPa. V případě pevnosti v ohybu byla pozorována v rámci jednotlivých souborů vyšší variabilita výsledků, než tomu bylo v případě smyku.

Tab. 6.34: Základní statistické charakteristiky pevnosti jedlového dřeva ve statickém ohybu

| Faktor | Počet měření | Průměr | Std.dev. | Std.err | -95,00 % | +95,00 % |
|--------|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | N | σ [MPa] | σ [MPa] | σ [MPa] | σ [MPa] | σ [MPa] |
| | 144 | 68,7 | 12,9 | 1,1 | 66,5 | 70,8 |
| A | 21 | 66,2 | 5,9 | 1,3 | 63,4 | 68,9 |
| B | 16 | 74,3 | 15,9 | 3,9 | 65,8 | 82,8 |
| C | 29 | 74,4 | 12,2 | 2,2 | 69,8 | 79,1 |
| D | 25 | 70,6 | 12,3 | 2,5 | 65,5 | 75,7 |
| E | 28 | 57,8 | 8,6 | 1,6 | 54,4 | 61,1 |
| F | 25 | 70,7 | 13,7 | 2,7 | 65,0 | 76,4 |



Obr. 6.141: Průměrná pevnost v ohybu ve směru vláken jedlového dřeva jednotlivých výběrových souborů



Obr. 6.142: Pevnost v ohybu jedlového dřeva ve směru vláken jednotlivých výběrových souborů

Výsledky jednofaktorové analýzy potvrdily i v případě pevnosti ve statickém ohybu významné rozdíly mezi jednotlivými výběrovými soubory. Na základě výsledků Duncanova testu (tab. 6.35) můžeme jednotlivé soubory podle průměrných hodnot pevnosti seřadit následovně:

E < A, B, C, D, F,

A < B, C,

D ≅ F ≅ C ≅ B.

Tab. 6.35: Výsledky Duncanova testu – ohyb

| | A 66,2 | B 74,3 | C 74,4 | D 70,6 | E 57,8 | F 70,7 |
|---|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| A | | 0,029526 | 0,030887 | 0,201139 | 0,014847 | 0,215710 |
| B | 0,029526 | | 0,971991 | 0,313412 | 0,000008 | 0,299923 |
| C | 0,030887 | 0,971991 | | 0,317637 | 0,000008 | 0,315657 |
| D | 0,201139 | 0,313412 | 0,317637 | | 0,000305 | 0,968067 |
| E | 0,014847 | 0,000008 | 0,000008 | 0,000305 | | 0,000338 |
| F | 0,215710 | 0,299923 | 0,315657 | 0,968067 | 0,000338 | |

6.5.5 Výsledky jednofaktorové analýzy rozptylu ANOVA pro jednotlivé pevnosti

Hodnoty F-testu potvrdily ve všech případech významný rozdíl pevnosti mezi jednotlivými skupinami na nejvyšší hladině významnosti (99,9 %).

Tab. 6.36: Výsledky analýzy rozptylu ANOVA pro hodnoty pevnosti dřeva v tlaku

| | SS | Degr. of | MS | F | p |
|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Intercept | 341091,1 | 1 | 341091,1 | 27676,09 | 0,000000 |
| "skupiny A-F" | 15337,2 | 5 | 3067,4 | 248,89 | 0,000000 |
| Error | 1984,2 | 161 | 12,3 | | |

Tab. 6.37: Výsledky analýzy rozptylu ANOVA pro hodnoty pevnosti dřeva v tahu

| | SS | Degr. of | MS | F | p |
|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Intercept | 635423,0 | 1 | 635423,0 | 1242,573 | 0,000000 |
| "skupiny A-F" | 22862,1 | 5 | 4572,4 | 8,941 | 0,000000 |
| Error | 75683,8 | 148 | 511,4 | | |

Tab. 6.38: Výsledky analýzy rozptylu ANOVA pro hodnoty pevnosti dřeva ve smyku

| | SS | Degr. of | MS | F | p |
|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Intercept | 8309,319 | 1 | 8309,319 | 11135,66 | 0,000000 |
| "skupiny A-F" | 41,308 | 5 | 8,262 | 11,07 | 0,000000 |
| Error | 121,629 | 163 | 0,746 | | |

Tab. 6.39: Výsledky analýzy rozptylu ANOVA pro hodnoty pevnosti dřeva v ohybu

| | SS | Degr. of | MS | F | p |
|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Intercept | 664462,0 | 1 | 664462,0 | 4218,254 | 0,000000 |
| "skupiny A-F" | 4734,2 | 5 | 946,8 | 6,011 | 0,000045 |
| Error | 22367,9 | 142 | 157,5 | | |

Pevnost jako absolutní veličina není srovnatelná mezi jednotlivými kategoriemi lišícími se stářím. Důvodem je vysoký vliv hustoty. Jednofaktorová analýza rozptylu ANOVA (tab. 6.36 - 6.39) tak ukazuje, že pro vyloučení tohoto vlivu je nutné použít normovanou veličinu měrné pevnosti, která odstraní vliv hustoty u jednotlivých vzorků.

6.5.5.1 Přepočet výsledků na měrnou pevnost

Experimentální výsledky ukázaly, že různě staré jedlové dřevo (z různě starých staveb) vykazovalo různou pevnost. Na rozdílech této pevnosti se podílely zejména dva faktory – jeho hustota a zdravotní stav dřeva. V případě, že bychom rozdělili dřevo z jednotlivých souborů podle pevnosti v tlaku do jednotlivých kategorií dle Reginače a kol. [76], tak bychom dostali následující rozdělení:

- C – dřevo s nízkou pevností (25–35 MPa),
- E – dřevo s průměrnou pevností (35–45 MPa),
- A, B, D, F – dřevo s nadprůměrnou pevností (45–60 MPa).

Naměřená data vykazují vysokou variabilitu s ohledem na hustotu v jednotlivých věkových kategoriích. S ohledem na prokázanou a obecně platnou závislost pevnostních a pružnostních charakteristik na hustotě je nutné vyloučit při hodnocení vlivu stáří na mechanické parametry vliv tohoto efektu. Abychom vyloučili vliv rozdílné hustoty, hodnotili jsme pevnost hmotnostní jednotky dřeva. Obecně platí, že dřevo je tím kvalitnější, čím větší je podíl mezi pevností a hustotou dřeva. Tento poměr se nazývá měrná pevnost [2]. Tato normalizace výběrového souboru vůči hustotě se používá u vysoce heterogenních materiálů s vysoce proměnlivou hustotou. Vyjadřuje kvalitativní míru pevnosti s vyloučením efektu hustoty a stanoví se dle rovnice 6.2 [76]:

$$k = \frac{\sigma_{12}}{10 \cdot \rho_{12}} \quad (6.2)$$

kde: σ_{12} ... pevnost při 12% vlhkosti v [MPa]
 ρ_{12} ... hustota dřeva při 12% vlhkosti v [g·cm⁻³]

Tímto přepočtem byla pevnost vztažena na hustotu, čímž se kvalita dřeva značně zhomogenizovala (tab. 6.40). Z výsledků uvedených v tab. 6.40 jsou mezi hodnotami měrných pevností malé rozdíly.

Výsledky

Podle Reginače *a kol.* [76] je možné dřevo ze všech souborů (A-F) podle hodnot měrných pevností zařadit do skupiny středně pevných a pevných dřev. Minimální rozdíly v hodnotách měrných pevností potvrdily, že hlavní podíl na různých výsledcích pevnosti v tlaku rovnoběžně s vlákny jedlového dřeva má jeho hustota nikoli věk.

Tab. 6.40: Pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny, hustota a měrná pevnost

| Skupina | Počet měření | Aritmetický průměr | Aritmetický průměr | Měrná pevnost |
|---------|--------------|--------------------|------------------------------|---------------|
| | N | σ [MPa] | ρ [kg·m ⁻³] | |
| | 144 | 45,3 | 521,7 | 8,68 |
| A | 21 | 45,8 | 563,7 | 8,12 |
| B | 16 | 48,4 | 523,1 | 9,25 |
| C | 29 | 26,9 | 307,5 | 8,74 |
| D | 25 | 57,6 | 653,4 | 8,81 |
| E | 28 | 41,8 | 467,3 | 8,94 |
| F | 25 | 50,8 | 613,2 | 8,28 |

Výsledky jsou v dobré shodě s výsledky, které uvádí Požgaj *et al.* [2]. V porovnání s jinými autory jsou hodnoty měrné pevnosti v uvedených výsledcích o něco nižší (tab. 6.41).

Tab.6.41: Hodnoty meze pevnosti v tlaku rovnoběžně s vlákny, hodnoty hustoty a hodnoty měrné pevnosti jedlového dřeva dle různých autorů

| Druh dřeva | Pevnost dřeva rovnoběžně s vlákny [MPa] | Hustota ρ_{12} [kg·m ⁻³] | Měrná pevnost | Autor |
|---------------|---|---|---------------|----------------------------|
| Jedlové dřevo | 30–43–67 | 330–460–670 | 9,34 | LEXA <i>a kol.</i> [103] |
| | 42,5 | 417 | 10,19 | PERELYGIN [104] |
| | 46,4 (ČR) | 487 | 9,52 | REGINÁČ <i>a kol.</i> [76] |
| | 41,4 (SR) | 439 | 9,43 | |
| | 34,1 | 419 | 8,14 | POŽGAJ <i>a kol.</i> [2] |
| | 33–50–79 | 330–470–680 | 10,63 | WAGENFÜR [105] |
| | 45 | 445 | 10,11 | UGOLEV [79] |

V případě ohybové pevnosti se stanovuje měrná pevnost podle rovnice 6.2, nebo speciálně podle rovnice 6.3:

$$k = \frac{\sigma_{12}}{10 \cdot \rho_{12}^2} . \quad (6.3)$$

Hodnoty měrné pevnosti pro ohyb jsou uvedeny v tab. 6.42. Podle Reginače *a kol.* [76] je dřevo pevné za předpokladu, že je hodnota měrné pevnosti větší jak 15. Tuto podmínku splňuje dřevo ze skupiny A, C, D a F. Hodnoty měrné pevnosti skupin B a E odpovídají středně pevnému dřevu. V porovnání s literaturou jsou uvedené výsledky měrné pevnosti nižší (tab. 6.43), ale jak bylo uvedeno, jedlové dřevo bez rozdílu věku splňuje kritéria skupiny dřev pevných, respektive středně pevných.

Tab. 6.42: Pevnost ve statickém ohybu, hustota a měrná pevnost

| Skupina | Počet měření | Aritmetický průměr σ [MPa] | Aritmetický průměr ρ [kg·m ⁻³] | Měrná pev- nost | Měrná pevnost speciální |
|---------|--------------|---|---|--------------------|----------------------------|
| | N | | | | |
| | 144 | 68,7 | 447,5 | 15,35 | 34,31 |
| A | 21 | 66,2 | 410,6 | 16,12 | 39,51 |
| B | 16 | 74,3 | 506,6 | 14,16 | 28,95 |
| C | 29 | 74,4 | 451,8 | 16,46 | 36,45 |
| D | 25 | 70,6 | 453,2 | 15,58 | 34,37 |
| E | 28 | 57,8 | 422,3 | 13,68 | 32,41 |
| F | 25 | 70,7 | 460,5 | 15,35 | 33,33 |

Tab. 6.43: Hodnoty meze pevnosti ve statickém ohybu, hodnoty hustoty a měrné pevnosti jedlového dřeva dle různých autorů

| Druh dřeva | Pevnost ve static- kém ohybu [MPa] | Hustota [kg·m ⁻³] | | Autor |
|------------------|---------------------------------------|----------------------------------|-------------|----------------------------|
| | | ρ_0 | ρ_{12} | |
| Jedlové dřevo | 42–66–116 | 330–460–670 | 14,34 | LEXA <i>a kol.</i> [103] |
| | 77,5 | 417 | 18,58 | PERELYGIN [104] |
| | 82,6 (ČR) | 487 | 16,96 | REGINÁČ <i>a kol.</i> [76] |
| | 72,7 (SR) | 439 | 16,56 | |
| | 71,5 | 419 | 17,06 | POŽGAJ <i>a kol.</i> [2] |
| | 49–78–136 | 330–470–680 | 16,59 | WAGENFÜR [105] |
| | 79 | 445 | 17,7 | UGOLEV [79] |

6.6 Vliv věku na tepelnou degradaci dřeva – vyhodnocení experimentu

Sledovaným faktorem popisujícím vliv stáří jedlového dřeva na jeho tepelnou degradaci byl úbytek hmotnosti zkušebních vzorků. Tato veličina je však ovlivněna i dalšími faktory, jako je vlhkost, hustota dřeva, jeho kvalita, geometrický tvar apod. V tab. 6.44 – 6.48 jsou uvedeny vstupní parametry zkušebních vzorků skupin A, B, D, E a F. Skupina C byla z experimentu vyřazena z důvodu rozsáhlého biotického napadení.

Tab. 6.44: Analýza hustoty a úbytku hmotnosti při věku A

| značení | a | b | c | V (cm ³) | m (g) | ρ (kg/m ³) | Δm (%) |
|---------|------|------|------|----------------------|-------|------------------------|----------|
| 8 | 4,13 | 1,93 | 1,84 | 0,014666 | 6,61 | 450,69 | 63,94984 |
| 13 | 4,28 | 1,93 | 2,04 | 0,016851 | 7,69 | 456,35 | 59,7035 |
| 16 | 4,1 | 1,93 | 1,96 | 0,015509 | 7,03 | 453,27 | 61,33333 |
| 18 | 4,1 | 1,76 | 1,93 | 0,013927 | 6,28 | 450,93 | 65,84158 |
| 20 | 4,09 | 1,98 | 1,92 | 0,015549 | 7,08 | 455,35 | 57,51825 |
| 44 | 3,99 | 2,02 | 1,98 | 0,015958 | 7,28 | 456,19 | 73,75887 |
| 68 | 4,19 | 1,94 | 1,94 | 0,015769 | 7,25 | 459,75 | 73,09353 |
| 70 | 4,07 | 1,97 | 1,92 | 0,015394 | 7,08 | 459,91 | 60,58824 |
| 73 | 4,16 | 1,86 | 1,93 | 0,014934 | 6,74 | 451,33 | 66,46248 |
| 74 | 4,11 | 1,99 | 1,94 | 0,015867 | 7,15 | 450,62 | 59,64912 |
| 75 | 4,09 | 2,07 | 1,93 | 0,01634 | 7,47 | 457,16 | 56,94444 |
| 83 | 4,09 | 1,85 | 1,9 | 0,014376 | 6,55 | 455,61 | 63,23296 |

Tab. 6.45: Analýza hustoty a úbytku hmotnosti při věku B

| značení | a | b | c | V (cm ³) | m (g) | ρ (kg/m ³) | Δm (%) |
|---------|------|------|------|----------------------|-------|------------------------|--------|
| 3 | 4,02 | 2,18 | 2,08 | 0,018228 | 8,23 | 451,50 | 77,58 |
| 15 | 3,94 | 2,04 | 2,1 | 0,016879 | 7,75 | 459,15 | 87,85 |
| 31 | 4,1 | 2,1 | 1,93 | 0,016617 | 7,69 | 462,77 | 77,82 |
| 33 | 3,8 | 2,06 | 2,08 | 0,016282 | 7,38 | 453,25 | 86,97 |
| 48 | 3,63 | 2,11 | 2,09 | 0,016008 | 7,25 | 452,90 | 80,88 |
| 55 | 3,75 | 2,08 | 2,09 | 0,016302 | 7,36 | 451,48 | 87,92 |
| 56 | 3,92 | 2,11 | 2,06 | 0,017039 | 7,72 | 453,09 | 78,31 |
| 57 | 3,81 | 2,1 | 2,11 | 0,016882 | 7,68 | 454,92 | 77,82 |
| 68 | 3,7 | 2,08 | 2,2 | 0,016931 | 7,81 | 461,28 | 78,82 |
| 73 | 3,89 | 2,08 | 2,06 | 0,016668 | 7,69 | 461,37 | 81,55 |
| 83 | 3,9 | 2,1 | 2,18 | 0,017854 | 8,16 | 457,04 | 80,31 |
| 84 | 3,98 | 2,05 | 2,05 | 0,016726 | 7,59 | 453,79 | 81,52 |

Výsledky

Tab. 6.46: Analýza hustoty a úbytku hmotnosti při věku D

| značení | a | b | c | V (cm ³) | m (g) | ρ (kg/m ³) | Δm (%) |
|---------|------|------|------|----------------------|-------|-----------------------------|----------------|
| 2 | 4,15 | 1,98 | 2,06 | 0,016927 | 7,65 | 451,9402 | 86,75862 |
| 4 | 4,17 | 2,07 | 2,06 | 0,017782 | 8,01 | 450,4628 | 88,01054 |
| 11 | 4,15 | 2,09 | 2,03 | 0,017607 | 8,11 | 460,6069 | 89,3368 |
| 39 | 4,16 | 2,08 | 2,15 | 0,018604 | 8,46 | 454,7526 | 87,34491 |
| 44 | 4,17 | 2,07 | 2,02 | 0,017436 | 7,88 | 451,9272 | 75,99469 |
| 54 | 4,06 | 2,08 | 2,19 | 0,018494 | 8,4 | 454,1986 | 78,50932 |
| 57 | 4,04 | 2,2 | 2,11 | 0,018754 | 8,59 | 458,0434 | 85,97561 |
| 59 | 3,98 | 2,08 | 2,17 | 0,017964 | 8,11 | 451,4553 | 80,98318 |
| 69 | 3,89 | 2,05 | 2,11 | 0,016826 | 7,76 | 461,1857 | 76,58999 |
| 71 | 3,88 | 2,07 | 2,04 | 0,016384 | 7,51 | 458,361 | 79,91632 |
| 79 | 4,1 | 2,05 | 2,01 | 0,016894 | 7,77 | 459,9252 | 77,32794 |
| 82 | 4,44 | 2,12 | 2,04 | 0,019202 | 8,76 | 456,1998 | 82,89474 |

Tab. 6.47: Analýza hustoty a úbytku hmotnosti při věku E

| značení | a | b | c | V (cm ³) | m (g) | ρ (kg/m ³) | Δm (%) |
|---------|------|------|------|----------------------|-------|-----------------------------|----------------|
| 9 | 3,95 | 1,87 | 2,08 | 0,015364 | 7,05 | 458,87 | 80,96 |
| 26 | 3,81 | 2,14 | 2,06 | 0,016796 | 7,66 | 456,06 | 74,70 |
| 29 | 3,92 | 2,07 | 2,06 | 0,016716 | 7,58 | 453,47 | |
| 40 | 4,27 | 2,07 | 2,07 | 0,018297 | 8,41 | 459,65 | 82,68 |
| 58 | 4,16 | 2,01 | 2 | 0,016723 | 7,46 | 446,09 | 77,45 |
| 63 | 3,9 | 2,05 | 2,07 | 0,01655 | 7,55 | 456,20 | |
| 65 | 4,31 | 2,03 | 1,96 | 0,017149 | 7,87 | 458,93 | 87,44 |
| 70 | 3,96 | 1,78 | 2,04 | 0,01438 | 6,46 | 449,25 | 85,77 |
| 80 | 3,83 | 2,16 | 2,12 | 0,017538 | 8,09 | 461,28 | 75,64 |
| 81 | 3,9 | 2,02 | 2,06 | 0,016229 | 7,34 | 452,29 | 78,66 |
| 82 | 3,87 | 2,18 | 2,05 | 0,017295 | 7,82 | 452,15 | 81,51 |
| 83 | 3,94 | 2,16 | 2,03 | 0,017276 | 7,98 | 461,91 | 81,94 |

Tab. 6.48: Analýza hustoty a úbytku hmotnosti při věku F

| značení | a | b | c | V (cm ³) | m (g) | ρ (kg/m ³) | Δm (%) |
|---------|------|------|------|----------------------|-------|-----------------------------|----------------|
| 11 | 3,94 | 2,07 | 1,93 | 0,015741 | 7,13 | 452,97 | 70,17 |
| 22 | 3,95 | 2,08 | 1,81 | 0,014871 | 6,71 | 451,21 | 73,17 |
| 28 | 4,1 | 2,03 | 2,06 | 0,017145 | 7,73 | 450,85 | 70,18 |
| 35 | 4,1 | 2,11 | 2 | 0,017302 | 7,91 | 457,17 | 70,12 |
| 36 | 4,01 | 2,01 | 2 | 0,01612 | 7,19 | 446,02 | 76,25 |
| 38 | 4,12 | 1,96 | 2,06 | 0,016635 | 7,59 | 456,27 | 66,76 |
| 39 | 4,05 | 2,08 | 1,9 | 0,016006 | 6,91 | 431,72 | 70,47 |
| 42 | 4,06 | 1,96 | 2,02 | 0,016074 | 7,16 | 445,43 | 74,00 |
| 44 | 4,04 | 2,08 | 1,85 | 0,015546 | 6,92 | 445,13 | 68,74 |
| 47 | 4,02 | 1,95 | 2,06 | 0,016148 | 7,33 | 453,92 | |
| 60 | 3,91 | 2,12 | 2,06 | 0,017076 | 7,91 | 463,23 | 71,30 |
| 71 | 3,98 | 2,04 | 2,01 | 0,01632 | 7,62 | 466,92 | 78,75 |

Výsledky

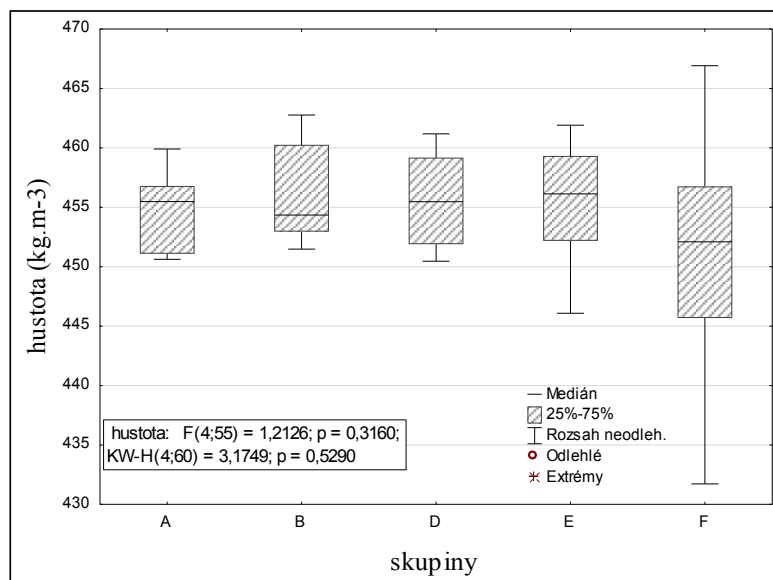
V tab. 6.49 a 6.50 je uvedena základní popisná statistika pro hustoty a úbytky hmotnosti skupiny A-F mimo skupinu C.

Tab. 6.49: Popisná statistika pro soubory vysokých hustot věku A - F

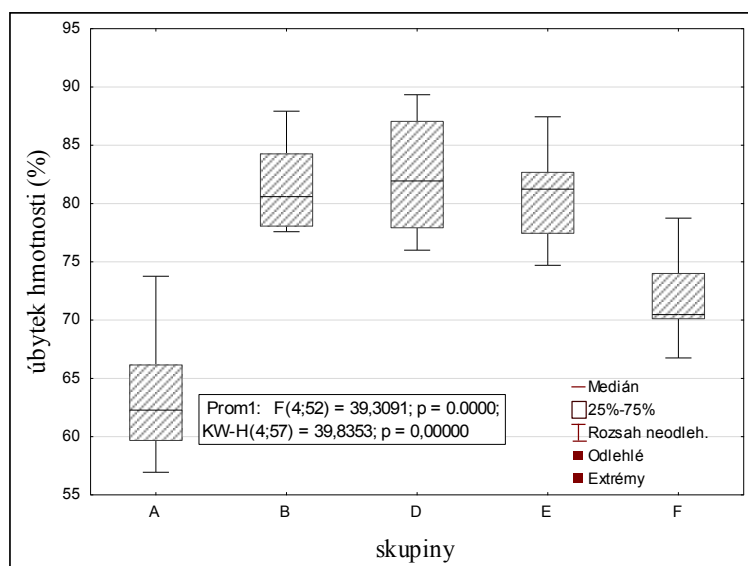
| | N plat-ných | Průměr | Medián | Minimum | Maximum | Rozptyl | Sm.odch. | Šikmost | Špičatost | V (%) |
|---|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|-----------|-------|
| A | 12 | 454,762 | 455,478 | 450,618 | 459,908 | 11,379 | 3,373 | 0,122 | -1,241 | 0,741 |
| B | 12 | 456,043 | 454,352 | 451,478 | 462,770 | 16,901 | 4,111 | 0,547 | -1,374 | 0,901 |
| D | 12 | 455,754 | 455,476 | 450,462 | 461,185 | 14,707 | 3,834 | 0,063 | -1,585 | 0,841 |
| E | 12 | 455,511 | 456,131 | 446,086 | 461,909 | 24,446 | 4,944 | -0,505 | -0,601 | 1,085 |
| F | 12 | 451,737 | 452,090 | 431,723 | 466,923 | 85,152 | 9,227 | -0,480 | 1,115 | 2,042 |

Tab. 6.50: Popisná statistika pro soubory úbytku na hmotnosti věku A - F

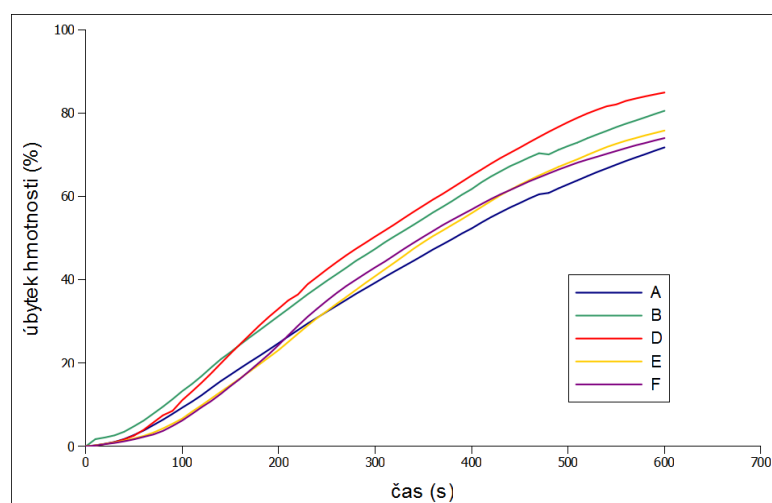
| | N plat-ných | Průměr | Medián | Minimum | Maximum | Rozptyl | Sm.odch. | Šikmost | Špičatost | V (%) |
|----|-------------|--------|--------|---------|---------|---------|----------|---------|-----------|-------|
| A1 | 12 | 63,506 | 62,283 | 56,944 | 73,758 | 30,271 | 5,501 | 0,886 | -0,032 | 8,663 |
| B1 | 12 | 81,445 | 80,595 | 77,580 | 87,920 | 15,730 | 3,966 | 0,872 | -0,795 | 4,869 |
| D1 | 12 | 82,470 | 81,938 | 75,994 | 89,330 | 23,621 | 4,860 | 0,036 | -1,727 | 5,893 |
| E1 | 10 | 80,675 | 81,235 | 74,700 | 87,440 | 17,070 | 4,131 | 0,137 | -0,722 | 5,121 |
| F1 | 11 | 71,810 | 70,470 | 66,760 | 78,750 | 11,970 | 3,459 | 0,770 | 0,310 | 4,818 |



Obr. 6.143: Krabicové grafy vysokých hustot pro všechny věkové skupiny



Obr. 6.144: Krabicové grafy úbytků hmotnosti pro všechny věkové skupiny



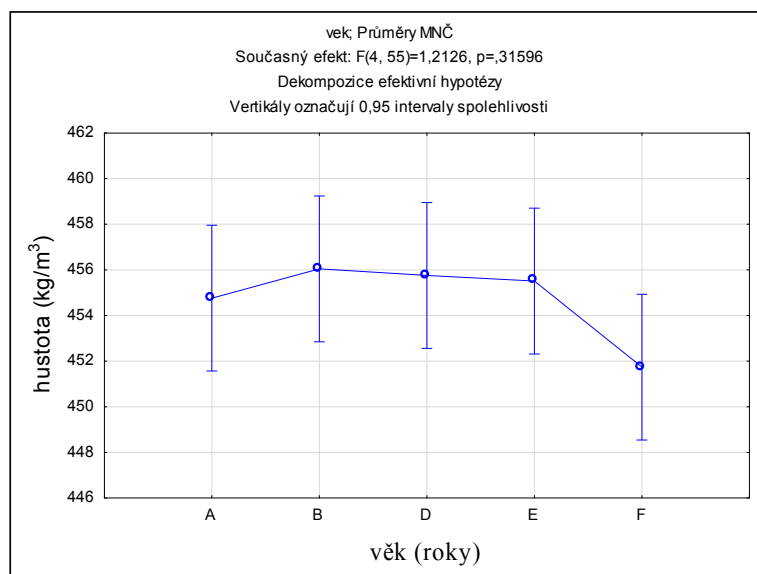
Obr. 6.145: Závislost úbytku hmotnosti na čase pro skupiny A, B, D, E a F

Dále byla provedena analýza rozptylu ANOVA (tab. 6.51), kdy byla zkoumána závislost věku na hustotě. Jinými slovy, jestli věk ovlivňuje hustotu. Za předpokladu, že výsledky analýzy prokáží, že není možné předpokládat, že rychlost hoření neovlivňuje věk, ale hustota. Hustota dřeva jako velmi variabilní veličina může být i u historických zabudovaných dřev velmi podobná hustotě u rostlého dřeva, ovšem za předpokladu, že dřevo historicky starší není napadeno biologickými činiteli.

Tab. 6.51: Výsledky analýzy rozptylu

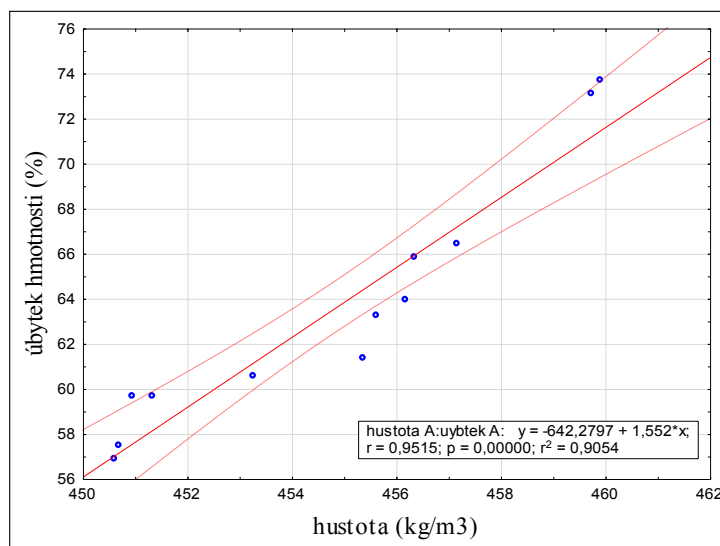
| | SČ | Stupně | PČ | F | p |
|-----------|----------|--------|----------|----------|----------|
| Abs. člen | 12408509 | 1 | 12408509 | 406605,4 | 0,000000 |
| věk | 148 | 4 | 37 | 1,2 | 0,315957 |
| Chyba | 1678 | 55 | 31 | | |

Z výsledků uvedených v tab. 6.51 vyplývá, že účinek faktoru se projevil jako statisticky nevýznamný. Na základě výsledků F – testu a hladiny významnosti P – účinku je možné konstatovat, že zvolený faktor – věk - je statisticky nevýznamný, na 99,9% hladiny významnosti.

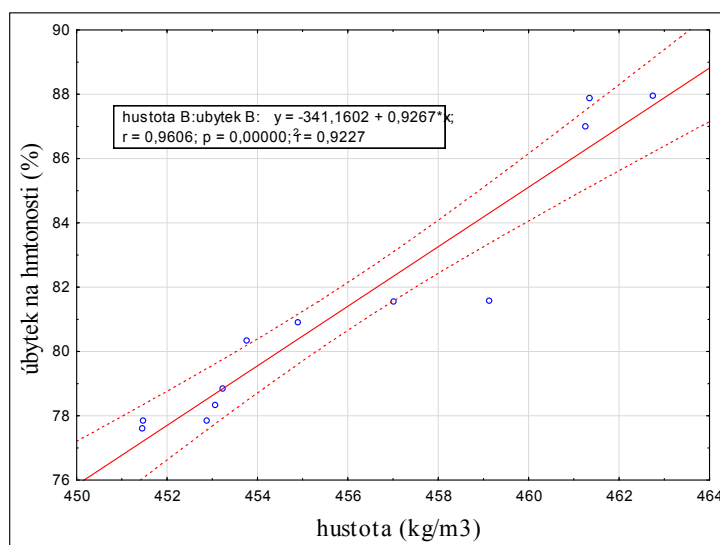


Obr. 6.146: Graf 65procentních intervalů spolehlivosti zobrazujících vliv věku na hustotu pro jednotlivé skupiny

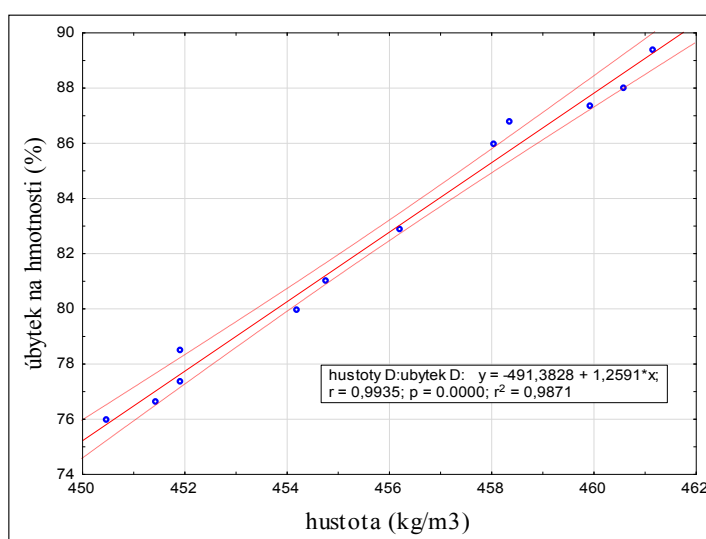
Vzájemná závislost úbytku hmotnosti na hustotě byla zkoumána pomocí regresní analýzy u všech vybraných skupin. Výsledky regrese jsou uvedeny na obr. 6.147 – 6.151.



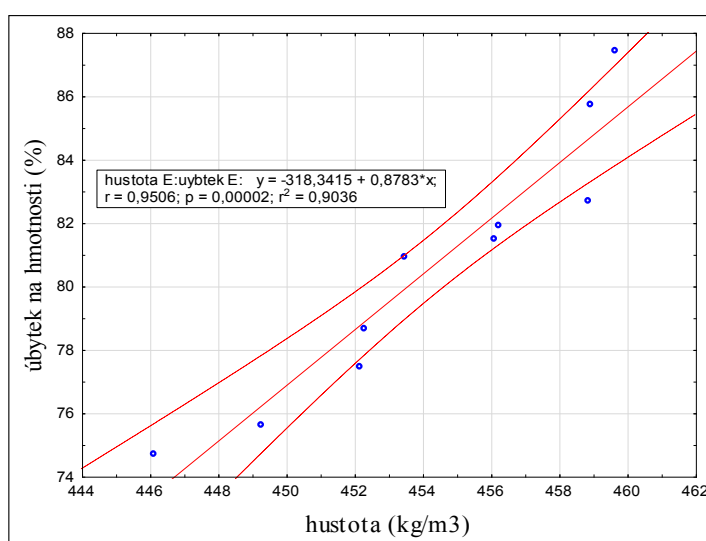
Obr. 6.147: Regresní závislost úbytku hmotnosti na hustotě při věku A



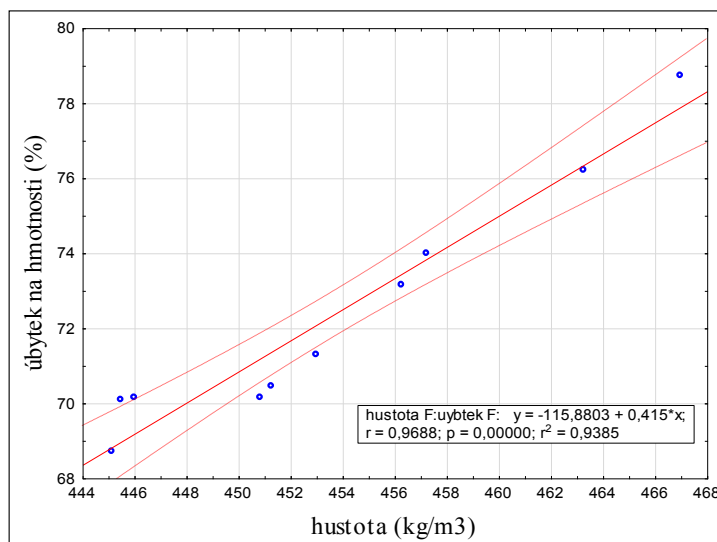
Obr. 6.148: Regresní závislost úbytku hmotnosti na hustotě při věku B



Obr. 6.149: Regresní závislost úbytku hmotnosti na hustotě při věku D



Obr. 6.150: Regresní závislost úbytku hmotnosti na hustotě při věku E



Obr. 6.151: Regresní závislost úbytku hmotnosti na hustotě při věku F

Regresní analýza závislosti úbytků hmotnosti na hustotě pro skupiny A až F vykazuje vysoké korelační závislosti. Pro skupinu A je regresní rovnice $y = -642,2797 + 1,552 \cdot x$ s korelačním koeficientem $r^2 = 0,91$, je tedy možné konstatovat, že mezi úbytkem hmotnosti a hustotou je silná funkční závislost. Pro skupinu B je rovnice $y = -341,1602 + 0,9267 \cdot x$ s korelačním koeficientem $r^2 = 0,92$.

Skupina D má závislost popsanou rovnicí $y = -491,3828 + 1,2591 \cdot x$ s koeficientem $r^2 = 0,99$. Pro skupinu E je tvar rovnice $y = -318,3415 + 0,8783 \cdot x$ s korelačním koeficientem $r^2 = 0,90$. Pro skupinu F je regresní rovnice $y = -115,8803 + 0,415 \cdot x$ s hodnotou korelačního koeficientu $r^2 = 0,97$. Pro všechny skupiny je závislost významná.

7 Diskuse

7.1 Dendrochronologické datování

Dendrochronologické datování prvků z památkově chráněných objektů (zámek Rychvald, dům v Palkovicích, sýpka ve Velké Polomi a svobodný dvůr v Bernarticích), bylo provedeno podle standardních metod chronologie šířek letokruhů. Celkem bylo odebráno a datováno 20 konstrukčních prvků ze všech uvedených historických objektů (tab. 6.16). Pro možnost datace byla použita standardní chronologie jedle pro Moravu. Letokruhové křivky jednotlivých stromů, ze kterých byly prvky vyrobeny, vykazovaly růstové trendy, které jsou pro každý jeden strom individuální, což vede k zeslabení hledaných společných signálů. Pro eliminaci růstových trendů byla zvolena spline funkce o délce 25 let, pomocí které byla provedena detrendace neboli standardizace letokruhových řad.

7.2 Sorpční vlastnosti dřeva

Dřevo je hygroskopický materiál, který má schopnost měnit svoji vlhkost podle vlhkosti okolního prostředí [2]. Využití druhotně použitého dřeva pro památkově chráněné objekty předpokládá snížení sorpčních vlastností, tedy zajištění rozměrové stálosti dřeva. Dřevo získané ze stavebních prvků starých budov má nižší koeficienty sesychání. Podle autorů Esteban *et al.* [9, 10] jde o jev, který je z fyzikálního hlediska způsobený nejen zvýšením hysterezního koeficientu, který se blíží hodnotě 1, ale také mechanismem nazývaným autory jako hygroskopické stárnutí dřeva. To lze definovat jako ztrátu hygroskopické reakce dřeva na změny prostředí danou procesem zmenšení polarit buněčných stěn [10]. Struik (1978) [9, 10] definuje tento jev jako proces nevratný.

Tendence dřeva být neustále v dynamické rovnováze s okolním vzduchem je dána přítomností polárních skupin -OH v hydrofilních polymerech buněčné stěny, celulózách a hemicelulózách, které jsou schopny vázat molekuly vody prostřednictvím vodíkových vazeb na svůj povrch. Tím dřevo získává hygroskopický charakter. Esteban *et al.* [9] hygroskopické stárnutí vysvětluje permanentním nasycením některých -OH skupin dané blízkostí jiných skupin (H-C-OH apod.), které vedou ke ztrátě hygroskopické

kých a rozměrových reakcí. Tuto ztrátu reakce přisuzují spíše pokračujícímu poklesu koncentrace OH skupin při stárnutí dřeva než samotnému stupni krystalizace celulózy [9]. Tyto teorie potvrzují i výsledky, které uvádí Ali a Emsley (2001) [9, 10], kdy se dle jejich výsledků stupeň krystalizace sice mění v prvních letech stárnutí, nicméně s pokračujícím procesem stárnutí se již významně nemění. Je však zřejmé, že v určitém časovém období v procesu stárnutí dřeva dochází ke snížení amorfního podílu celulóz a hemicelulóz s největším obsahem polárních skupin, což znamená, že se zvyšuje podíl krystalického podílu přispívajícího ke stabilitě dřeva vůči změnám prostředí. Této problematice bylo věnováno několik studií [80, 25, 24].

Výsledky sorpční analýzy uvedené v kapitole 6.2 (obr. 6.6a) nemohou uvedené teorie rozšířit, protože prokázaly, že stávající metodika pro běžné stavební materiály není vyhovující pro tak heterogenní anizotropní materiál, jakým je dřevo. V samotném návrhu experimentu je nutné se zaměřit zejména na dostatečný počet vzorků pro zajištění přijatelné chyby sledované veličiny. Případně rozfázovat experiment na několik částí, které se budou zabývat pouze sestavením vhodného výběrového souboru, v němž budou potlačeny další nežádoucí efekty, jež mohou významným způsobem ovlivnit výsledné hodnocení hygroskopických vlastností dřeva, jako například vliv biotických činitelů, růstové vady, odklon vláken, reakční dřevo apod.

7.3 Analýza mikroskopické struktury

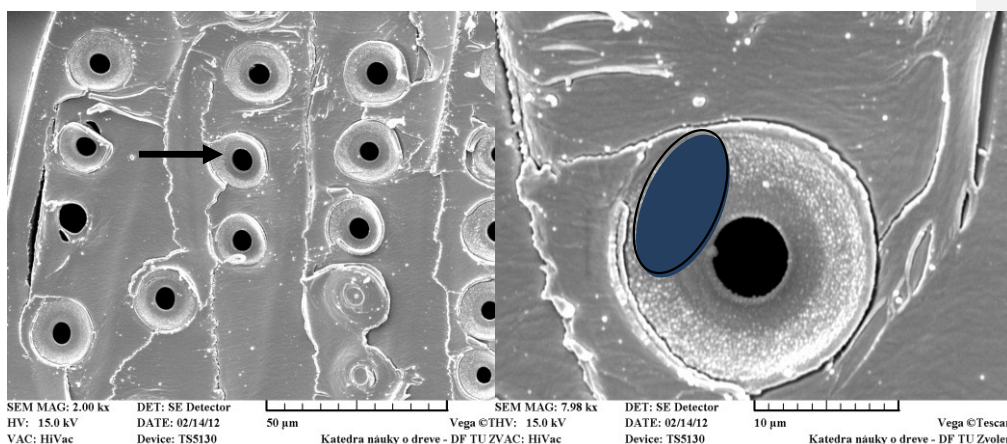
Při hodnocení vlivu času na strukturu a vlastnosti dřeva je potřebné vydefinovat vlastnosti recentního dřeva, z něhož byly jednotlivé stavební prvky vyhotovené. Mikroskopická analýza vzorků dodaného dřeva jednoznačně prokázala, že vzorky A, B, C, D, E a F měly původ v botanickém rodu *Abies*. Vzhledem ke středoevropskému původu dřeva lze předpokládat, že jde o dřevinu „*Abies alba* MILLER“, která byla a ještě stále je v malém množství přirozeně rozšířená v oblasti českých a slovenských hor. Jelikož v této středoevropské oblasti se vyskytuje pouze jeden druh jedle, můžeme s velkou jistotou předpokládat, že se jedná o uvedený druh jedle bílé (*Abies alba* MILLER).

7.3.1 Struktura dřeva jedle (*Abies alba*)

Mikroskopická stavba jedlového dřeva je tvořená vláknitými buňkami (tracheidami), jejichž objemový obsah je více než 90 %, a parenchymatickými buňkami, které vytvářejí dřevné paprsky. Průměrné hodnoty podélných a příčných rozměrů vláken jsou podobné jako u smrkového dřeva. Příčné radiální rozměry se samozřejmě mění podle umístění v ročním přírůstku. Jarní tracheidy jsou široké cca 40 μm , tracheidy letního dřeva mají přibližně poloviční tloušťku. V opačném poměru je tloušťka buněčné stěny. Jarní tracheidy jsou tenkostěnné, letní jsou hrubostěnné.

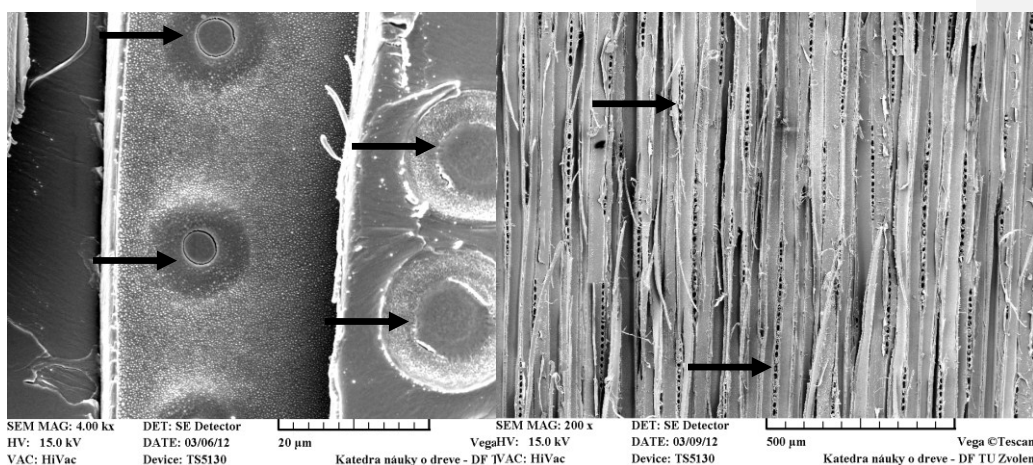
Tracheidy mají po povrchu velké množství ztenčenin typu dvojtečky, které zajišťují intertracheidální vodivé propojení jednotlivých vláknitých buněk (obr. 7.1). Vnitřní dutina těchto dvojteček má u jedle typický bradavičnatý povrch (obr. 7.2), čímž se liší od smrku, který má tento povrch hladký. Dvojtečky na radiální řezné anebo štěpné ploše mohou být viditelné při velkém zvětšení jako funkční, anebo jako aspirované, kdy je torus přisátý na porus (obr. 7.3). Tento stav může souviset s kvalitou transpiračního toku v živém stromě, ale může též souviset se zpracováním dřeva, především s procesem sušení. Dřevné paprsky jsou u jedle pouze jednořadové (tangenciální plochy, bez přítomnosti pryskyřičných kanálků (obr. 7.4). Paprsky jsou homogenní, tvořené pouze jedním typem a tvarem parenchymatických buněk (obr. 7.6). Křížové pole, tj. plocha, kde se křížuje dřevný paprsek s podélnými tracheidami, je tvořené taxodioidními ztenčeninami, které jsou typické pro rod *Abies*. V jednom křížovém poli jsou 2 – 4 ztenčeniny (obr. 7.5). Dřevné paprsky jsou vysoké průměrně 15 – 25 buněk. V okrajových parenchymatických buňkách se ojediněle objevují krystalky [81].

Anatomická struktura šesti vzorků sledovaného dřeva vykazovala stejnou strukturu. Na štěpných plochách nebyly pozorované znaky, které by svědčily o tom, že by během cca 400 let došlo ke změnám. 400 let je z hlediska vývoje rostlin či dřevin velmi krátká doba na to, aby se ve struktuře objevily pozorovatelné morfologické změny. Nilsson a Daniel [82] zjistili minimálně ultrastrukturální změny na dřevě starém 4400 let. Tedy z pohledu evolučního vývoje dřevin jsme na dřevě sledovaných vzorků nepozorovali žádné změny.



Obr. 7.1: Ztenčiny na radiálních plochách vláken

Obr. 7.2: Bradavičnatý povrch na vnitřní straně dvojtečky

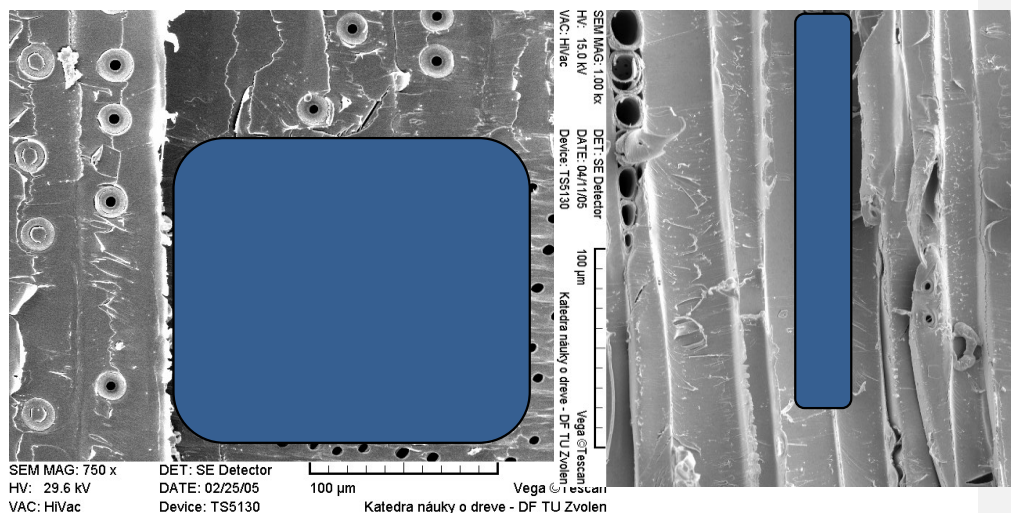


Obr. 7.3: Aspirované dvojtečky

Obr. 7.4: Jednořadové dřeňové paprsky na tang. řezu

Otázkou však je, zda během expozice - zabudování dřevěného prvku v historické stavbě, nenastaly morfologické změny, které by byly pozorovatelné pod mikroskopem při zvětšení struktury dřeva (max. do 10 000x). Z tohoto pohledu byla mikroskopická analýza provedená na radiálních a tangenciálních plochách zkoumaného dřeva. Při sledování struktury pěti vzorků dřeva je potřebné brát v úvahu tři faktory:

- Faktor vlivu doby expozice
- Faktor vlivu napadení dřeva dřevokaznými houbami
- Faktor preparační techniky



Obr. 7.5: Taxodioidní křížové pole

Obr. 7.6: Homogenní dřevový paprsek

Pokud chceme sledovat faktor doby expozice na strukturu dřeva, musíme vyloučit vliv přítomnosti hyf hub ve dřevě. Respektive je potřebné rozlišit, které morfologické změny přisoudíme vlivu napadení dřeva dřevokaznými houbami a které změny by mohly souviset jen s dobou expozice dřevěného stavebního prvku zabudovaného v historické stavbě. Třetí faktor, faktor preparační techniky, nebereme v úvahu, protože u všech vzorků byla použita stejná preparační technika a stejná byla rovněž vlhkost dřeva při přípravě mikroskopických vzorků pro elektronovou mikroskopii. Tento faktor se tedy musí projevit u všech vzorků stejně.

Nejvýznamnější změny ve struktuře radiálních a tangenciálních ploch dřeva jsme sledovali na tvaru fraktur vláknitých buněk dřeva. Fraktury na vláknech probíhaly příčně anebo podélně, tvarově byly tupé anebo jehlicovité. U některých štěpných ploch se objevovalo více fraktur, u jiných ploch docházelo k oddělování vláken ve středních lamelách až primárních stěnách a fraktury se prakticky netvořily.

Když posuzujeme tvar fraktur na recentním (současném, zdravém) dřevě, tvar fraktury je závislý od polohy v letokruhu, ať už se jedná o jarní anebo o letní dřevo. Podobně tvar fraktury ovlivňuje také rozdíl v kvalitě juvenilního a staršího dřeva, což souvisí s morfologií vlákna a také s úhlem ukládání mikrofibril v jednotlivých vrstvách buněčné stěny. Toto jsou vlivy stavby dřeva na tvar fraktur.

Jiným velmi významným vlivem na tvar fraktur je vliv degradace dřeva dřevokaznými houbami. Tento vliv dokážeme hodnotit díky přítomnosti hyf ve struktuře dřeva. Právě u těch vzorků, u nichž byla pozorovaná přítomnost hyf, se objevovaly fraktury více tupé než jehlicovité. Tvar fraktur je však závislý také na typu houby, která degraduje dřevo. Fraktura závisí na tom, kterou vrstvu buněčné stěny, resp. kterou základní chemickou látku houba rozkládá, degraduje.

Recentní a zdravé dřevo (F vzorek) se při štípání v prakticky suchovzduchovém stavu odděluje nejvíce ve střední lamele, v letním dřevě se objevují také jehlicovité fraktury. Podobnou morfologii štěpné plochy jsme pozorovali také na vzorku nejstarším (A – vzorek), pouze v jarním dřevě se objevovaly i tupé fraktury. Větší množství fraktur a rovněž větší množství tupých fraktur přisuzujeme už přítomnosti hub, i když výskyt hyf byl jen sporadický. Vzorek B vykazuje oba typy fraktur. Přítomnost hyf je malá, ale jejich vliv se projevuje i na degradaci buněčných stěn.

Vzorek C je silně poškozený dřevokazným hmyzem a významná je rovněž přítomnost hyf. Fraktury vláknitých buněk jsou v převážné většině tupé, což přisuzujeme vlivu výrazné přítomnosti hyf. Dřevní vlákna jsou na štěpné ploše uvolňována ve střední lamele, přes primární stěnu a také přes buněčnou stěnu. Již samotná barva dřeva naznačuje, že dřevo je výrazně napadené hnědou hnilobou.

Dřevo vzorku E při štípání vykazuje uvolňování vláken přes střední lamelu a primární stěnu, což morfologicky nejvíce odpovídá recentnímu dřevu. Fraktury přes buněčné stěny se neobjevují, což svědčí o dobré kvalitě buněčných stěn. Hyfy byly u tohoto vzorku pozorované jen ojediněle. Dalším posuzovaným morfologickým znakem jsou ztenčeniny na stěnách vláknitých buněk. Dvojtečky jedlového dřeva jsou tvořené s typickou bradavičnatou vrstvou vnitřního povrchu. Tento znak nevykazoval žádné pozorovatelné změny mezi vzorky A až F.

Na sledovaných mikroskopických preparátech byly pozorované dvojtečky s funkční polohou torusu, tj. s torusem umístěným ve středu dvojtečky. Jiné dvojtečky byly aspirované, tj. torus byl přisátý na porus, což způsobuje, že dvojtečka je nefunkční, nepropouští vodu z lumenu jednoho vlákna do druhého. Otázkou však je, kdy nastala aspirace dvojteček. Nejvíce dvojteček bylo aspirovaných v polohách č. 3, tj. v polohách blíže k dřeni, což v živém stromě představuje tzv. zralé dřevo. Toto dřevo je významně vyřazené z vodivé činnosti kmene právě aspirováním, uzavíráním dvojteček [21].

Dvojtečky se uzavírají také během sušení dřeva [83]. Lze předpokládat, že na počtu aspirovaných dvojteček se mohl projevit i způsob sušení. Přirozeně, informace o tom, jak byly dřevěné konstrukční prvky historických staveb sušené, nemáme, předpokládáme však, že veškeré stavební prvky byly sušené stejným přirozeným sušením. Nepředpokládáme ovšem, že by po přirozeném vysušení a zabudování stavebního prvku do stavby docházelo k aspirování dvojteček. Myslíme si, že doba, během níž byl dřevěný stavební prvek zabudovaný v historické stavbě, nemá vliv na kvantitu aspirovaných dvojteček.

Je potřebné věnovat pozornost ještě jednomu znaku na dvojtečkách. Téměř na všech štěpných radiálních plochách bylo na dvojtečkách pozorované odtrhávání torusu od marga. Protože poškození dvojteček bylo pozorované na nejstarším dřevě (vzorek A), jakož i na vzorku recentního dřeva (vzorek F) a také na ostatních vzorcích, nepředpokládáme, že by bylo možné tento znak přisuzovat věku, tj. stárnutí dřeva.

7.4 Chemická analýza

7.4.1 Uvolňování terpenů při dlouhodobém používání a při termické úpravě

Množství a složení terpenů ve dřevě závisí na druhu dřeviny, lokalitě růstu, období těžby atd. V jedlovém dřevě se vyskytují zejména α -pinen, β -pinen, limonen, Δ^3 -karen, kamfen, β -felandren, myrcen, a to v různých koncentracích od stopových množství až po desítky procent v závislosti na druhu a lokalitě [84, 85, 5, 86]. V našich vzorcích byl zjištěn výskyt α -pinen, kamfen, β -pinen, α -felandren, cymen, limonen, fenchol, borneol, tymol, myrtenal, verbenon (tab. 6.18).

V jehličnatých dřevinách se nachází přibližně 0,1 – 0,6 % ve dřevě, přičemž v jehličí byly zjištěny cca 5krát vyšší koncentrace ve srovnání se dřevem [87, 88]. Námi stanovené koncentrace jednotlivých terpenů i jejich celkového množství jsou nižší, než byly zjištěny v čerstvě skácených stromech. Důvodem je částečné vyprchání terpenů v průběhu používání, a to i u nejmladšího vzorku. Z údajů v tab. 6.18 vyplývá, že množství terpenů v jedlovém dřevě klesá se stářím použitého materiálu, přičemž pokles je největší mezi současným vzorkem dřeva a 100letým vzorkem. Největší množství terpenů se tedy uvolnilo z jedlového dřeva v prvních letech používání, později se rychlost uvolňování zpomalila z důvodu jejich nízkého zůstatkového množství. Uvedené výsledky jsou podobné, jako zjistili jiní autoři při skladování štěpků jehličnatého dřeva při různých vlhkostech – množství terpenů ve dřevě klesá časem exponenciálně [89, 88].

Teplota 60 °C způsobila pokles množství terpenů v čerstvém dřevě (vzorek F) o 62 %, teplota 120 °C o > 99 %, tab. 6.19 a 6.20. Výsledky jiných autorů se liší v závislosti na teplotě a metodě působení. McDonald and Wastney [90] zjistili o 60-70 % vyšší emise prchavých organických látek (VOC) při teplotě 140 °C než při 120 °C, a zatímco Ingram *et al.* nepozorovali v emisích VOC mezi teplotami 82 °C a 118 °C žádné rozdíly, Banerjee [72] zjistil vzrůst emisí α -pinenu se vzrůstající teplotou v intervalu teplot 105-200 °C. Peters *et al.* [91] zjistili cca 30 % pokles množství terpenů ve smrkovém dřevě při jeho modifikaci při teplotě 180 °C, při teplotě 200 °C už nepozorovali další pokles jejich koncentrace.

Pokles terpenů ve vzorcích dřeva, které bylo používáno dlouhou dobu, může způsobovat jeho vyšší odolnost vůči dřevokazným škůdcům. Kromě celkového množství terpenů však odolnost ovlivňuje také koncentrace β -pinenu a poměr β : α -pinenu Nerg *et al.* [92], α -pinen zvyšuje aktivitu a orientaci škůdců (*Hylotrupes bajulus* L.) [93]. Na druhé straně feromony verbenon a p-cymen-8-ol produkované výměšky hmyzích larev *H. bajulus* znásobovaly kladení vajíček [94]. Termická ochrana dřeva, při které se dosáhne v celém průřezu používaných dílců teploty minimálně 60 °C, zaručuje zničení veškerých živých forem dřevokazného hmyzu (vajíčka, larvy, dospělí jedinci) a sníží množství terpenů ve dřevě, které mohou sloužit jako atraktanty pro tyto škůdce. Použité podmínky tepelné úpravy zároveň nemají negativní vliv na mechanické vlastnosti dřeva, a mohou být proto aplikovány jako vhodná ekologická i ekonomická alternativa jeho ochrany.

7.4.2 Chemické změny jedlového dřeva v procesu stárnutí

Během procesu stárnutí nenastávají výrazné změny v chemickém složení dřeva za předpokladu, že je dřevo uloženo v suchých podmínkách. Z výsledků uvedených v tab. 6.21 vyplynulo, že k největším chemickým změnám dochází v případě extraktivních látek (4násobný nárůst) a zejména v případě hemicelulóz, kde byl zaznamenán pokles až o 24 %.

Ve smrkovém a borovicovém dřevě ze střešních konstrukcí starých 290 a 365 let byl podobně zjištěn pokles hemicelulóz a vzrůst látek rozpustných v organických rozpouštědlech [11]. Výrazný pokles hemicelulóz, resp. holocelulózy při stárnutí dřeva uvádějí i Borgin *et al.* [95], Zborowska *et al.* [96] a Sandak *et al.* [73].

Celulóza během stárnutí dřeva podléhá rozkladu, ovšem pomaleji než je tomu u hemicelulóz, a za určitých podmínek se může její množství v archeologickém dřevě také zvyšovat. Tyto změny jsou závislé na podmínkách a délce stárnutí, např. ve vlhkém prostředí je množství celulózy ve srovnání s ligninem velmi malé [97]. Fengel [11] nepozoroval změny v množství celulózy smrkového a borovicového dřeva starého 290 a 365 let, v dubovém dřevě byly hodnoty celulózy v současném a 700 let starém dubovém dřevě prakticky stejné, větší množství obsahovalo 1000 let staré dřevo, v ještě starších vzorcích nastal úbytek celulózy [73]. Z výsledků uvedených v tab. 6.21 se potvrdilo, že v průběhu 390 let stárnutí dochází k mírnému vzrůstu množství celulózy v důsledku rychlejší degradace hemicelulóz. Podobný trend byl zjištěn také v dubovém dřevě starém 8100 a 8500 let [98].

Lignin je za určitých podmínek (zejména tma a nepřítomnost vzduchu) během stárnutí dřeva jeho nejstabilnější složkou. Světlo, zejména ultrafialové záření a vzdušný kyslík, způsobuje změny v množství ligninu i v jeho struktuře. Oxidační změny byly zjištěny v bukovém ligninu už po několika dnech skladování štěpků a v borovicových kmenech po 15 letech stárnutí [11]. Z výsledků bylo zřejmé, že v jedlovém dřevě v průběhu stárnutí došlo k mírnému úbytku ligninu, pravděpodobně v důsledku oxidačních změn, které při jeho stanovení způsobily větší rozpustnost v dané kyselině. Podobný jev pozoroval rovněž Borgin *et al.* [99], kteří zjistili průběh oxidačních reakcí ligninu ve dřevě po stárnutí jehličnatého dřeva 4100 - 4300 let v suchém vzduchu.

Ve dřevě se nacházejí dvě hlavní formy ligninu (guajacylový a syringylový). Guajacylový je vůči mikrobiologické degradaci odolnější než syringylový, což vysvětluje, proč jsou jehličnaté dřeviny, které obsahují téměř výlučně guajacylový typ ligninu, trvanlivější než listnaté, ve kterých je kromě guajacylového typu ligninu přítomný také syringylový typ [100]. Oba typy ligninů se během stárnutí chovají odlišně – v jehličnatých dřevinách má tendenci ke kondenzačním reakcím, přičemž dochází ke zvyšování molových hmotností, v listnatých dřevinách převládají degradační reakce a hodnoty molových hmotností klesají [98, 11, 100]. Naopak, Colombini *et al.* [97] zjistili degradaci ligninů v obou typech dřevin. Rozdílné závěry lze vysvětlit rozličným charakterem vzorků (stáří, způsob uložení).

Významnou charakteristikou ovlivňující pevnostní vlastnosti dřeva je polymerizační stupeň a distribuce molových hmotností celulózy. Při dlouhodobém stárnutí dubového dřeva (8100 let) byl zjištěn mírný vzrůst polymerizačního stupně i krystalinity celulózy, což je důsledkem přednostní degradace celulózy v její amorfni části [98]. V průběhu stárnutí jedlového dřeva nebyly v hodnotách polymerizačních stupňů ani polydisperzity, ani v distribuci molových hmotností nebyly pozorovány významné změny (tab. 6.24 a obr. 6.127). Lze tedy předpokládat, že celulóza je za daných podmínek vůči působení vnějších činitelů stabilní, že se pevnostní vlastnosti dřeva nebudou v důsledku degradace celulózy zhoršovat. Tyto výsledky jsou podobné pozorováním jiných autorů [101, 73], kteří metodou infračervené spektroskopie v blízké oblasti (NIR) zjistili, že amorfni část celulózy podléhá mírným změnám, zatímco krystalická část je odolná.

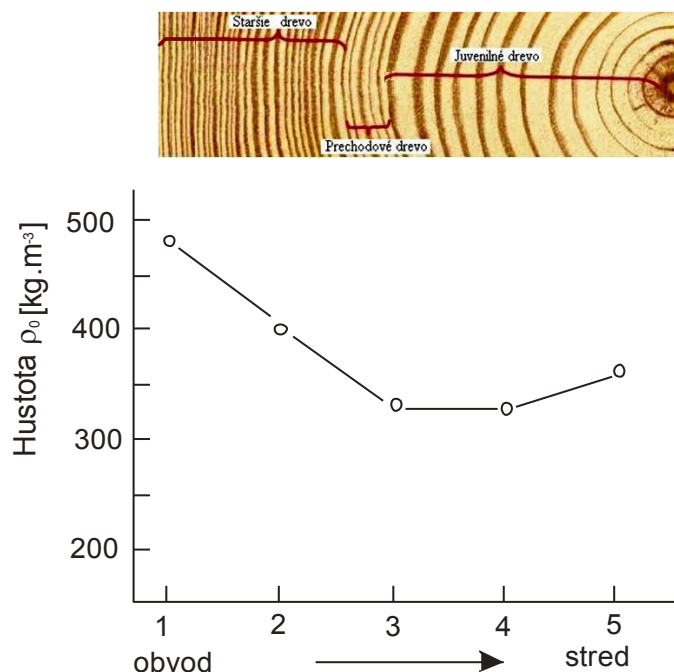
7.5 Mechanické vlastnosti

7.5.1 Pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny

Výsledné hodnoty měření pevnosti v tlaku rovnoběžně s vlákny potvrdily, že rozhodující vliv na pevnost nemá stáří daného zkoumaného jedlového dřeva, ale významná je jeho kvalita. Jinými slovy, rozhodujícími faktory ovlivňujícími pevnost jsou degradace dřeva dřevokazným hmyzem a následné snížení jeho hustoty. Tlaková pevnost dřeva byla v těsné korelaci (silná funkční závislost) s hustotou a měnila se v souladu

se stanovenou rovnicí (6.1). Z tohoto důvodu měla změna hustoty významný vliv na změnu pevnosti. Tato skutečnost byla nejvýrazněji pozorovatelná u skupiny C.

Rozdíly v hustotě mezi jednotlivými soubory byly zapříčiněny nejen případnou biologickou degradací, ale zejména i způsobem (místem) odběru vzorků z jedlového výřezu. Hustota v případě jedlového dřeva se mění od dřeně směrem k obvodu (obr. 7.7). Jak je patrné z obr. 7.7, v blízkosti dřeně je hustota nejnižší (juvenilní dřevo) a směrem k obvodu roste. To znamená, že pokud bylo těleso vybráno ze středové části, mělo nízkou hustotu, tedy i nízkou pevnost. Naopak, tělesa z obvodové části (s úzkými ročními přírůstky) obsahovala výrazně vyšší podíl letního dřeva, v důsledku čehož měla vyšší hustotu a tím i pevnost.



Obr. 7.7: Změna hustoty po průřezu smrkového dřeva [102]

Pro srovnání uvádíme výsledky pevnosti v tlaku rovnoběžně s vlákny a hustoty jedlového dřeva naměřené jinými autory (tab. 7.1). Pevnost všech souborů (kromě souboru C) je v dobré shodě i s literárními údaji.

Tab. 7.1: Hodnoty meze pevnosti v tlaku rovnoběžně s vlákny a hustoty jedlového dřeva podle různých autorů

| Druh dřeva | Pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny [MPa] | Hustota [kg·m ⁻³] | | Autor |
|---------------|---|-------------------------------|-------------|---------------------|
| | | ρ_0 | ρ_{12} | |
| Jedlové dřevo | 30–43–67 | 300–430–640 | 330–460–670 | LEXA a kol. [103] |
| | 42,5 | 390 | 460 (15) | PERELYGIN [104] |
| | 46,4 (ČR) | 459 | – | REGINÁČ a kol. [76] |
| | 41,4 (SR) | 412 | – | |
| | 34,1 | 392 | – | POŽGAJ a kol. [2] |
| | 33–50–79 | 300–430–640 | 330–470–680 | WAGENFÜR [105] |
| | 45 | 420 | 445 | UGOLEV [79] |

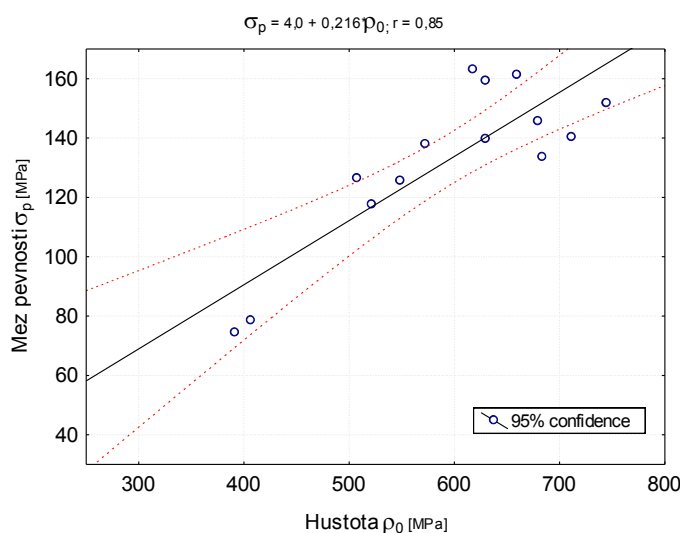
7.5.2 Pevnost v tahu rovnoběžně s vlákny

Podobně jako v případě tlaku jsme zjišťovali závislost pevnosti dřeva v tahu na hustotě. Jak je patrné z obr. 7.8, bez ohledu na druh dřeva, pevnost v tahu rovnoběžně s vlákny roste lineárně úměrně s hustotou. Korelace není tak těsná jako v případě tlaku. Pokud uvažujeme o hustotě jedlového dřeva, která je uvedena v tab. 6.29, pak by se na základě regresní rovnice uvedené na obr. 7.8 měly průměrné hodnoty pevnosti v tahu pohybovat mezi 90–140 MPa. Ve skutečnosti jsou však nižší. Je však nutné mít na zřeteli, že pevnost v tahu významně ovlivňují také jiné faktory, které mohou překrýt vliv hustoty. Takovým faktorem je odklon vláken od podélné osy [106, 2].

Pevnost v tahu výrazně klesá s rostoucím odklonem vláken od podélné osy, čehož důkazem je řádově nižší pevnost v tahu kolmo na vlákna. Už malý odklon vláken, který může vzniknout při přípravě těles, způsobuje významný pokles pevnosti. Toto je pravděpodobně příčinou nízkých hodnot pevnosti v tahu také v našem případě, protože těleso byla připravena pilováním a nikoliv štípáním. Dalším významným faktorem, který se podílel na nižších hodnotách pevnosti v tahu, byla degradace dřeva tesaříkem. Pevnost v tahu reagovala na narušení dřeva tesaříkem citlivěji než při tlakové zkoušce. Nevylučují se ani první stadia hniloby, která nebyla vizuálně patrná, ale na poklesu pevnosti se už mohla projevit. Pro srovnání uvádíme v tab. 7.2 výsledky měření pevnosti dřeva v tahu publikované jinými autory. Naše výsledky se ve většině případů rozcházejí s výsledky autorů uvedených v tab. 7.2.

Tab. 7.2: Hodnoty meze pevnosti jedlového dřeva v tahu rovnoběžně s vlákny podle různých autorů

| Druh dřeva | Pevnost v tahu rovnoběžně s vlákny [MPa] | Autor |
|---------------|--|----------------------------|
| Jedlové dřevo | 40–90–245 | LEXA <i>a kol.</i> [103] |
| | 106,5 | PERELYGIN [104] |
| | 73,6–128,7 | REGINÁČ <i>a kol.</i> [76] |
| | 74,4 | POŽGAJ <i>a kol.</i> [2] |
| | 21–90–245 | WAGENFÜR [105] |
| | 101 | UGOLEV [79] |



Obr. 7.8: Závislost meze pevnosti dřeva v tahu rovnoběžně s vlákny na hustotě [78]

7.5.3 Pevnost ve smyku

Z výsledků pevnosti dřeva ve smyku byly nejnižší hodnoty naměřeny u souborů A (nejstarší dřevo) a E, nicméně z praktického hlediska se nejednalo o hodnoty výrazně snížené. V tabulce 7.3 opět uvádíme pro srovnání výsledky pevnosti dřeva ve smyku publikované jinými autory. Výsledky pevnosti všech testovaných souborů jsou ve velmi dobré shodě s literárními údaji, a to platí i pro soubory A a E. Pevnost jedlového dřeva jednotlivých testovaných souborů byla nejhomogennější.

Tab. 7.3: Hodnoty meze pevnosti jedlového dřeva ve smyku rovnoběžně s vlákny podle různých autorů

| Druh dřeva | Pevnost ve smyku rovnoběžně s vlákny [MPa] | Autor |
|---------------|--|---------------------|
| Jedlové dřevo | 5,4–6,7–12 | LEXA a kol. [103] |
| | 5,3 | PERELYGIN [104] |
| | 6,9 | REGINÁČ a kol. [76] |
| | 6,7 | POŽGAJ a kol. [2] |
| | 4,0–6,7–12,0 | WAGENFÜR [105] |
| | 6,7 | UGOLEV [79] |

7.5.4 Pevnost ve statickém ohybu

Naše výsledky pevnosti v ohybu dobře korespondují s výsledky, které uvádějí jiní autoři (tab. 7.4). Výjimkou je soubor E, jehož průměrná pevnost v ohybu byla nižší.

Tab. 7.4: Hodnoty meze pevnosti ve statickém ohybu a hustoty jedlového dřeva podle různých autorů

| Druh dřeva | Pevnost v ohybu [MPa] | Hustota [kg·m ⁻³] | | Autor |
|---------------|-----------------------|-------------------------------|-------------|---------------------|
| | | ρ_0 | ρ_{12} | |
| Jedlové dřevo | 42–66–116 | 300–430–640 | 330–460–670 | LEXA a kol. [103] |
| | 77,5 | 390 | 460 (15) | PERELYGIN [104] |
| | 82,6 (ČR) | 459 | – | REGINÁČ a kol. [76] |
| | 72,7 (SR) | 412 | – | |
| | 71,5 | 392 | – | POŽGAJ a kol. [2] |
| | 49–78–136 | 300–430–640 | 330–470–680 | WAGENFÜR [105] |
| | 79 | 420 | 445 | UGOLEV [79] |

V případě ohybu jsme zjišťovali i závislost meze pevnosti na hustotě. Vycházeli jsme ze skutečnosti, že platí lineární závislost pevnosti v ohybu na hustotě bez rozdílu druhu dřeva (obr. 7.9) [78]. Vzhledem k tomu, že se nepotvrdil statisticky významný rozdíl mezi parametry rovnic pro radiální a tangenciální směr dle autora (obr. 7.9), vliv anatomického směru lze zanedbat a pro praktické účely se doporučuje rovnice

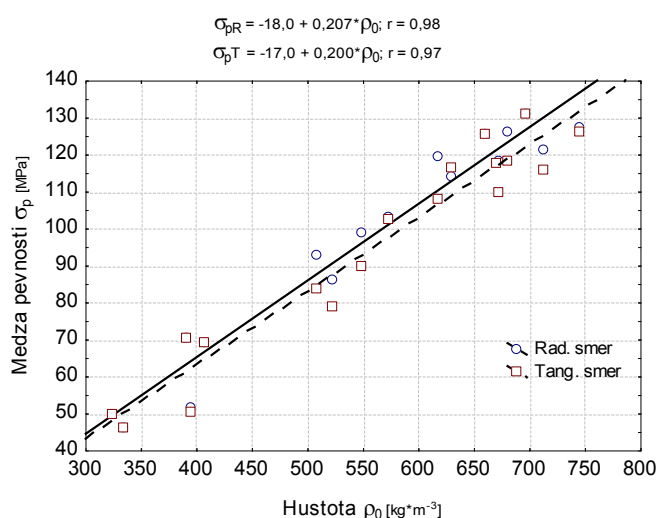
$$\sigma_{oh} = -17,5 + 0,203 \cdot \rho_0 \quad (7.1)$$

s korelačním koeficientem $r = 0,97$.

kde: σ_{oh} ...mez pevnosti v ohybu

ρ_0 ...hustota při vlhkosti 0 %

Naše experimentální výsledky jsou v celkem dobré shodě s výsledky počítanými podle rovnice (7.1).



Obr. 7.9: Závislost meze pevnosti dřeva ve statickém ohybu na hustotě [78]

7.6 Vliv věku na tepelnou degradaci

Změny, které vznikají ve dřevě působením teplot, závisí na různých faktorech (druh dřeviny, teplota, způsob ohřevu, trvání ohřevu, prostředí – vzduch, inertní plyn, vlhkost apod.). Úbytek hmotnosti dřeva při jeho termické úpravě je jednou z nejdůležitějších charakteristik a běžně se používá k vyjádření kvality. Podle více autorů závisí úbytek hmotnosti při termickém působení na druhu dřeviny, prostředí, teplotě a času ohřevu. Publikované údaje však není možné porovnat, protože v jednotlivých experimentech byly použity různé podmínky úpravy (čas, druh dřeviny, počáteční vlh-

kost apod.). Z výsledků uvedených na obr. 6.145 je zřejmé, že nejstarší dřevo nejlépe odolává termické degradaci. Na základě průběhů by se dalo určit pořadí A, F, E, B a D.

Je tedy možné konstatovat, že pro tepelnou degradaci je významná hustota dřeva a případné biotické napadení, nikoli stáří testovaných vzorků. Tyto závěry potvrzují i regresní analýzy závislosti hustoty na úbytku hmotnosti obr. 6.147 – 6.151 a výsledky analýzy rozptylu tab. 6.51.

7.7 Synergické zhodnocení výsledků jednotlivých kapitol

Proces stárnutí dřeva lze označit za velmi komplikovaný proces. Bez ohledu na vágnost definice stárnutí celková šíře této problematiky přesahuje jakoukoliv vědeckou práci. Tato práce se snaží objasnit proces stárnutí z hlediska tří základních pilířů: chemické stavby, morfologických změn na mikroskopické úrovni a mechanických vlastností s tematickým zaměřením na obor stavebnictví. Na počátku práce byly vytipovány základní charakteristiky, které můžeme považovat za stěžejní pro určení a objasnění mechanických vlastností dřeva rozhodujících pro možné opětovné použití historického dřeva ve stavebním průmyslu.

Zásadním poznatkem této práce je prokázání statisticky nevýznamného efektu stáří dřeva na mechanické vlastnosti dřeva. Z inženýrského hlediska lze s jistou mírou zobecnění konstatovat srovnatelnost kvalitativních rysů mechanických vlastností vyjádřených formou měrné pevnosti (měrná pevnost je v oboru dřevařství označována za kvalitativní parametr) jak u dřeva historického, tak dřeva čerstvě pokáceného (viz kapitola Výsledky: Mechanické vlastnosti dřeva). Tento závěr lze vysvětlit prokázaným zachováním morfologické stavby, která (v případě malého či zanedbatelného vlivu biotických škůdců) nenachází rozdíl mezi anatomickou stavbou historického či současného dřeva (viz kapitola Výsledky: Mikroskopická analýza dřeva). Jelikož bylo prokázáno zachování makroskopické a mikroskopické stavby dřeva napříč sledovanými věkovými kategoriemi, bylo nutno hledat vysvětlení na chemické úrovni a posoudit, zda nedochází k významným kvantitativním či kvalitativním změnám, zejména ve vztahu k hlavní stavební složce makromolekuly celulózy, která je určující pro mechanické vlastnosti dřeva.

S ohledem na prokázanou degradaci hemicelulóz a pokles terpenů lze dřevo charakterizovat jako biologický materiál, který procesem stárnutí samovolně a přirozeným

způsobem zvyšuje svoji odolnost vůči biotickým škůdcům na základě snížení atraktivnosti vůči dřevokaznému hmyzu (poklesem terpenů) a dřevokazným houbám (většina dřevokazných hub začíná svůj rozklad právě u hemicelulózové složky). Zde je nutné připomenout, že s ohledem na prokázaný výskyt dřevokazných hub v testovaném původně zabudovaném dřevě nelze na základě získaných výsledků prokázat pokles hemicelulóz jako apriory důsledek působení času, ale je nutno předpokládat, že k poklesu hemicelulóz mohlo dojít v důsledku působení detekovaných dřevokazných hub.

Zcela zásadní pro sledované mechanické vlastnosti dřeva je prokázaný statisticky významný nárůst krystalického podílu celulózy s narůstajícím věkem dřeva. Jelikož na pevnostních vlastnostech se podílí právě krystalická celulóza, lze odvozovat, že s přibývajícím věkem má dřevo na chemické úrovni vlivem nárůstu podílu krystalické celulózy vyšší pevnost, než je tomu u dřeva čerstvě pokáceného. Fakt, že absolutní hodnoty pevnosti pro jednotlivé způsoby a směry zatížení nejsou srovnatelné v závislosti na věku, není v rozporu s předchozí větou, ale poukazuje na vliv biotických škůdců prokázaných zejména v části Výsledky: Mikroskopická analýza dřeva, a z části detekované i v kapitole Výsledky: Chemická analýza.

Mechanické vlastnosti musely být s ohledem na tento nezanedbatelný vliv biotických škůdců a rovněž s ohledem na omezený počet vzorků, který se promítá zejména ve vysoké variabilitě sledovaných vlastností, vyjádřeny v normované podobě měrné pevnosti, která redukuje vliv hustoty, jež je prokazatelně nejdůležitějším parametrem ve vztahu k mechanickým vlastnostem dřeva.

Výsledky této práce jednoznačně prokázaly srovnatelnost mezi historickým a současným dřevem jedle používaným v dřevěných konstrukcích na bázi mechanických vlastností jak na makroskopické, mikroskopické, tak chemické úrovni. Pro inženýrskou stavební praxi vyplývá z této práce rovněž závěr extrémní důležitosti identifikace zabudovaného dřeva napadeného biotickými škůdci (zejména dřevokazným hmyzem a houbami), kteří jsou převažujícím důvodem degradace dřeva a následné ztráty jeho požadovaných mechanických vlastností.

8 Závěr a aplikace výsledků v praxi

8.1 Závěr

V předložené disertační práci jsou v praktické části provedeny experimentální analýzy cíleně zaměřené na srovnání historicky starého dřeva a dřeva současného z pohledu jeho struktury a vlastností. Pro experimentální měření bylo vybráno jedlové dřevo (*Abies alba*) získané z konstrukcí historických objektů z oblasti Beskyd. Práce je rozdělena na dvě výzkumné části, přičemž první část analyzuje strukturu, chemické složení, sorpční a vybrané mechanické vlastnosti dřeva, které prošlo procesem stárnutí. Druhá část analyzuje strukturu a uvedené vlastnosti dřeva při tepelném zatížení. Práce ověřuje, zda technické vlastnosti a struktura starého dřeva splňují požadavky pro druhotné použití tohoto materiálu v historických stavbách.

Dosažené výsledky jsou shrnuty do následujících podkapitol:

8.1.1 Dendrochronologie

Vzorky pro dendrochronologické datování byly odebrány ze stropů a krovů dostupných částí historických objektů zámku Rychvald (vzorek A) a jeho hospodářské budovy (vzorek E). Dále domu v Palkovicích (vzorek B) a domu v Bernarticích (vzorek D). Vzorky skupiny C byly odebrány ze sýpky ve Velké Polomi. Jednalo se o stropnice, krokve, vaznice, průvlaky, sloupky, roubení a obvodové zdi. Detailní popis vzorků s uvedenou průměrnou chronologií a značením je uveden v tab. 6.16.

8.1.2 Sorpční vlastnosti dřeva

Pro sorpční analýzu nebyl vybrán reprezentativní soubor těles, zajišťující přijatelné chyby sledované veličiny. Všechny výběrové soubory byly testovány na normalitu rozdělení hodnot na základě Shapiro-Wilkova testu, přičemž většina souborů nevyhověla. U souborů, které nevyhověly testu normality, byla provedena Box-Coxova transformace. Uváděné charakteristiky polohy (aritmetický průměr) a variability (variační koeficient) jsou tedy reprezentativní odhady (příloha 11.1). Pro další návrh experimentu je

nutné zaručit dostatečný počet vzorků a rozfázovat experiment tak, aby byly eliminovány nežádoucí efekty, jako účinek biotických činitelů a růstové vady dřeva.

8.1.3 Mikroskopická analýza

Mikroskopická analýza dřeva byla provedena na 6 vzorcích, které byly vymanipulovány z dřevěných konstrukčních prvků zabudovaných v historických stavbách po různou dobu. Výsledky analýzy lze shrnout do následujících závěrů:

- Mikroskopické znaky vzorků dřeva jednoznačně prokázaly, že vzorky A, B, C, E a F odpovídaly jedlovému dřevu (*Abies alba*).
- Nejvýznamnější změny na struktuře radiálních a tangenciálních ploch dřeva byly pozorovány na tvaru fraktur vláknitých buněk dřeva. Morfologie těchto fraktur je ale ovlivněna rozdílnými vlastnostmi jarního a letního dřeva, juvenilního a staršího dřeva a taktéž degradací dřeva dřevokaznými houbami. Vliv hub byl detegován přítomností hyf v analyzovaném dřevě.
- Morfologie dvojteček se dobou expozice dřeva v historické stavbě neměnila. Rozdíly, které byly zjištěny mezi jednotlivými vzorky, resp. polohami analyzovaných preparátů (aspirace, odtrhávání torusu), přisuzujeme jednak poloze (zralé, resp. bělové dřevo stromu) a rovněž preparační technice, která uvedené artefakty vytvořila.
- Největší vliv na morfologii buněčných elementů dřeva na analyzovaných vzorcích měla přítomnost a činnost hub.

8.1.4 Chemická analýza

8.1.4.1 Uvolňování terpenů během stárnutí a termické úpravy dřeva

Terpeny, které mohou sloužit jako atraktanty pro dřevokazný hmyz, jsou v průběhu dlouhodobého používání uvolňované do prostředí a jejich množství ve dřevě klesá, což může být příčinou vyšší odolnosti starších dřevěných konstrukcí vůči některým druhům škůdců. Termická ochrana dřeva urychluje uvolňování terpenů. Teplota 60 °C způsobila pokles množství terpenů v čerstvém dřevě (vzorek F) o 62 %, teplota 120 °C o > 99 %. Při teplotě 60 °C mělo jedlové dřevo po 10 hodinách přibližně tolik

terpenů, jako termicky neupravené dřevo staré 150 let. Při termickém působení při teplotě 120 °C klesá množství terpenů na minimální koncentrace (0,7-1,1 mg.kg⁻¹).

8.1.4.2 Chemické změny dřeva v průběhu stárnutí

V jedlovém dřevě, které bylo používáno ve formě trámů v průběhu 390 let, nastaly změny v chemickém složení. Množství extraktivních látek vzrostlo ve srovnání se současným dřevem čtyřnásobně, množství celulózy o 13 %. Mírně pokleslo množství ligninu (o 4 %) a holocelulózy (o 4 %). Největší úbytek byl zjištěn v případě hemicelulóz (24 %), které jsou nejlabilnější složkou jedlového dřeva při jeho stárnutí. Z hemicelulóz se v jedlovém dřevě vyskytuje arabinoglucoronoxylan, který je ve srovnání s galaktoglucomanem méně odolný vůči stárnutí. V celulóze nebyly pozorovány významné změny, co se týká hodnot průměrného polymerizačního stupně ani polydispersity, poklesly však hodnoty průměrného polymerizačního stupně hemicelulóz, a to o 31 % (ve frakci extrahované 5% KOH) a o 41 % (ve frakci extrahované 24% KOH). V ligninu byla pozorována kondenzace a hodnoty molových hmotností vzrostly ve srovnání se současným jedlovým dřevem na téměř dvojnásobek.

8.1.5 Hodnocení pevnosti různě starého dřeva

Na základě pevnosti při různých způsobech zatížení jsme hodnotili kvalitu šesti souborů jedlového dřeva, které bylo odebráno ze stavebních objektů pocházejících ze 17. až po 21. století. Pokud dřevo přirozeným stárnutím ztrácí na kvalitě, pak by mělo platit, že čím starší dřevo, tím nižší pevnost. V takovém případě by uspořádání souborů podle hodnot pevnosti od nejnižší po nejvyšší mělo být v následovném pořadí:

$$A < B < C < D < E < F$$

Skutečné pořadí souborů bylo následovné:

$$C < E < A < B < F < D \text{ – tlak}$$

$$C < (A \cong B \cong E \cong F \cong D) \text{ – tah}$$

$$(A < E) < (B \cong C \cong D \cong F) \text{ – smyk}$$

$$\left. \begin{array}{l} E < A, B, C, D, F \\ A < B, C, \\ D \cong F \cong C \cong B. \end{array} \right\} \text{ohyb}$$

Při každém zatížení jsme dostali jiné pořadí. Tedy pořadí souborů podle pevnosti nebylo určováno stářím dřeva, ale jinými faktory – hustotou dřeva a degradací dřeva biotickými činiteli (dřevokazné houby a dřevokazný hmyz).

Jako nejslabší soubor se nejčastěji ukazoval soubor C a po něm soubor E, a to hlavně v důsledku napadení dřeva těchto souborů tesaříkem krovovým. Experimentální výsledky tedy potvrdily, že na pevnost dřeva, a tím ani na jeho trvanlivost nemá významný vliv přirozené stárnutí dřeva, nýbrž sekundární působení biotických činitelů. To může mít různou intenzitu jak u starého dřeva, tak i u dřeva mladšího. Záleží na podmínkách, kde se dřevo nacházelo.

S ohledem na tuto skutečnost, počet vzorků a vysokou variabilitu vlastností datných velmi často různorodými podmínkami původu testovaných vzorků bylo nutné vyloučit vliv hustoty, která ovlivňovala jednotlivé věkové kategorie nerovnoměrně. Z tohoto důvodu byla použita měrná pevnost jako kvalitativní míra pevnosti zohledňující různou hustotu vzorků v jednotlivých věkových kategoriích. S ohledem na tento fakt doporučuje autor pro budoucí výzkum v této oblasti homogenizovat výběrový soubor hustoty mezi jednotlivými věkovými kategoriemi vyloučením vad způsobených biotickou a neporovnatelnou abiotickou degradací, spolu s dostatečným navýšením počtu vzorků v tomto výběrovém souboru pro dosažení přijatelné odchylky od střední hodnoty. Normalizací hodnot pevností a jejich transformací na měrnou pevnost je možné konstatovat, že mechanické vlastnosti zůstaly v procesu stárnutí zachovány.

Na základě dosažených výsledků je možné tvrdit, že dřevo ze starých staveb je možné opětovně použít při rekonstrukci dřevěných konstrukčních prvků historických budov, pokud není napadené dřevokaznými houbami nebo dřevokazným hmyzem. Proto je nutné takové dřevo pečlivě vybírat.

8.1.6 Tepelná degradace dřeva

Závěrem je možné konstatovat, že uvedená metoda tepelného zatěžování je dostatečně citlivá a že poměrně dobře odhaluje rozdíly jednotlivých skupin na proces termické degradace dřeva. Uvedené poznatky jsou popsány i ve více odborných pracích. Je tedy možné konstatovat, že vliv věku dřeva není významný pro průběh termické degradace podle sledované metody. Jinými slovy věk neovlivňuje tepelnou degradaci dřeva z pohledu rozsahu a účinku. Větší vliv na sledované kritérium má hustota testovaného dřeva, případně mykologické nebo jiné biotické poškození dřeva. Za předpokladu, že je dřevo z historických objektů bez známek napadení, ať už dřevokazným hmyzem, nebo houbami, odolává vysokým teplotám stejně jako dřevo novodobé.

8.2 Aplikace výsledků v praxi

Výzkumná činnost byla zaměřena na zhodnocení starého dřeva z pohledu jeho struktury a vybranných fyzikálních a mechanických vlastností. Výsledky provedených analýz na mikroskopické a chemické úrovni potvrdily, že dřevo historicky staré má shodnou strukturu jako dřevo recentní, bez známek anomálií, které by byly možné přisuzovat právě procesu stárnutí. Z pohledu chemického složení bylo prokázáno, že dřevo historicky staré má nižší obsah hemicelulóz, což pozitivně ovlivňuje sorpční vlastnosti dřeva. Naopak procentický nárůst se potvrdil u hlavní složky dřeva, celulózy, což úzce souvisí s poklesem hemicelulóz, a tím zachováním pevnostních vlastností dřeva starého ve srovnání se dřevem referenčním. Terpeny, které byly považovány za atraktanty pro dřevokazný hmyz, jsou v procesu stárnutí uvolňovány, což vede k vyšší odolnosti historicky starých dřevěných konstrukcí vůči dřevokaznému hmyzu.

Práce byla dále zaměřena na simulaci vyšších teplot, kterým bylo vystaveno jak dřevo staré, tak i referenční. Horký vzduch o maximální teplotě 120 °C definoval podmínky prostředí během horkovzdušné sanace. Experimentální měření potvrdila, že z pohledu chemického složení dřeva uvedené tepelné zatížení urychluje uvolňování terpenů, a to o více jak 99 %. Je tedy možné sanaci horkým vzduchem považovat za termickou ochranu dřeva vůči potencionálnímu napadení dřevokazným hmyzem, ale také za sterilizační metodu již vzniklého biotického napadení.

V rámci práce byla dále řešena otázka velmi významná pro praxi, a to monitorování stavu historických a památkově chráněných krovových konstrukcí. Destruktivní metody jsou u těchto objektů zcela vyloučeny a mnohé nedestruktivní metody nedokáží sofistikovaně odhalit přesný rozsah poškození dané konstrukce. V rámci vyvíjení metody horkovzdušné sanace se práce zaměřuje i na tyto otázky. V rámci experimentálního měření byly získány výsledky z měření na dvou nedestruktivních zařízeních využívajících moderní techniky a tyto výsledky byly srovnány s destruktivní metodou. Měření byla prováděna na vzorcích o velikosti $150 \times 100 \times 25$ mm, které byly nainfikovány larvami tesaříka krovového. Výsledky metod jsou uvedeny v následujících podkapitolách.

8.2.1 Nedestruktivní metody detekce poškození biologických struktur pomocí CT (computed tomography)

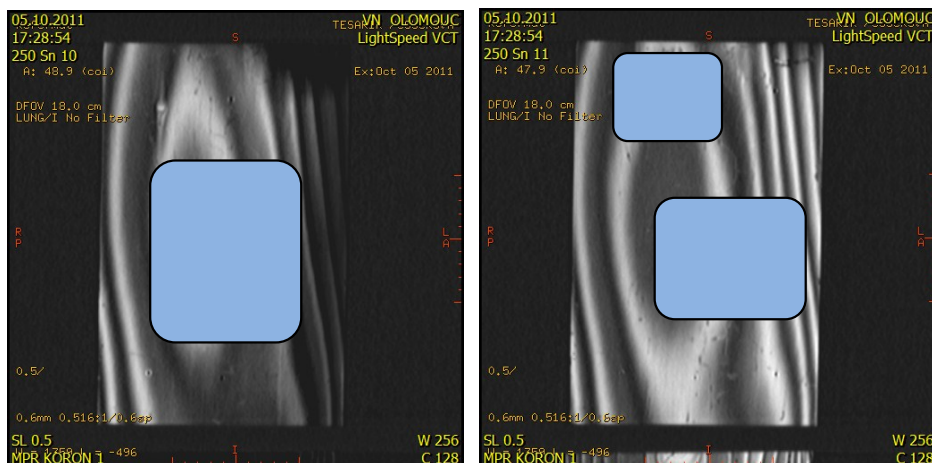
Snímání objektů probíhalo na lékařském multidetektorovém CT přístroji (VCT 64 LightSpeed), obr. 8.1, od firmy General Electric USA. Zařízení disponuje keramickým detektorem 64 řad /0,625 x 64 - 40 mm/ s napětím 80-140 kV a proudem 10-800 mA. Zdrojem RTG záření je rentgenová lampa (vznik RTG záření). Rotační čas CT zařízení je 0,35-1 sekund a tloušťka řezu 0,625 - 5 mm.

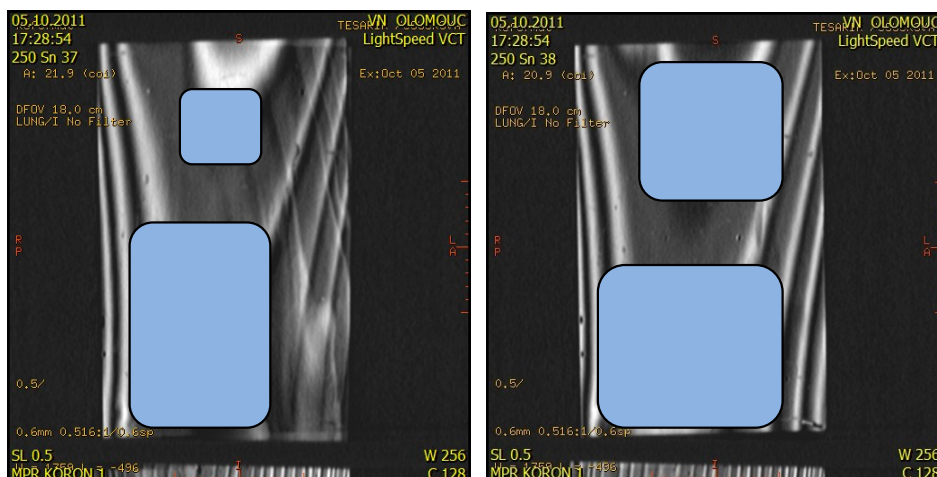


Obr. 8.1: Multidetektorový CT přístroj VCT 64 LightSpeed

Vzorky napadené dřevokazným hmyzem, konkrétně tesaříkem krovovým (*Hylotrupes Bajulus* L.), byly uloženy na pojízdný stůl, kde docházelo ke snímání zájmových oblastí za současného kontinuálního pohybu objektu snímaného CT zařízením, obr. 8.1. RTG (ionizující) záření procházelo vyšetřovaným objektem (vzorek C1) a na základě různých hustot objektu docházelo k částečnému pohlcování záření, toto oslabené záření dopadalo na druhé straně na soustavu detektorů (registrace oslabeného záření). Měření se provádělo okolo celého obvodu výšky objektu, přičemž každé měření mělo číslo odpovídající intenzitě dopadlého oslabeného záření, místu registrace a úhlu, pod kterým bylo měření realizováno. Celý soubor měření byl podroben filtrovaným zpětným projekcím a adaptivní statistické iterativní rekonstrukci za vzniku tomografického obrazu jako výstupu obrazové informace v DICOM formátu, obr. 8.2.

Snímky vzorků C1 (CT computed tomography)

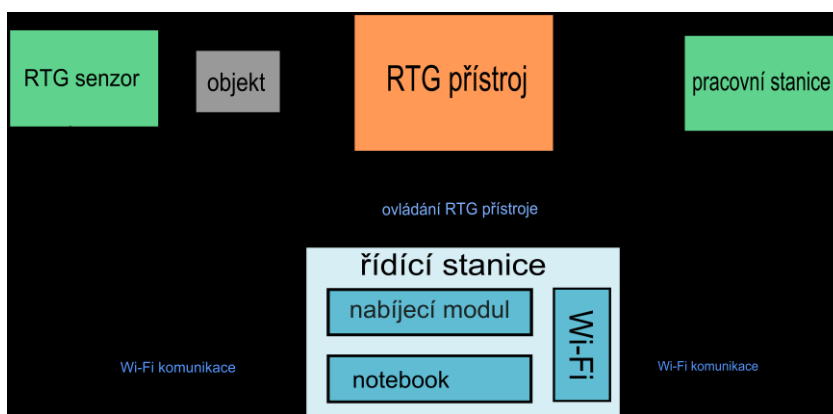




Obr. 8.2: Tomografické obrazy vzorků dřeva napadeného dřevokazným hmyzem z CT zařízení

8.2.2 Nedestruktivní metody detekce poškození biologických struktur pomocí rentgenového záření (RTG)

Rentgenové pracoviště, obr. 8.3, se skládá z rentgenového přístroje, obr. 8.4, pracovní stanice, obr. 8.5, senzoru rentgenového záření, obr. 8.6, a řídicí stanice v transportním kufru, obr. 8.7, který obsahuje speciální notebook se softwarem pro rychlý náhled RTG snímků, nabíjecí modul pro snímací senzor a WiFi router pro komunikaci s RTG senzorem a pracovní stanicí.



Obr. 8.3: Schéma zapojení RTG pracoviště



Obr. 8.4: Rentgenový přístroj ($0,32 \div 100 \text{ mAs}$, $0 \div 40 \text{ kV}$)



Obr. 8.5: Pracovní stanice pro výpočet míry poškození biologické struktury

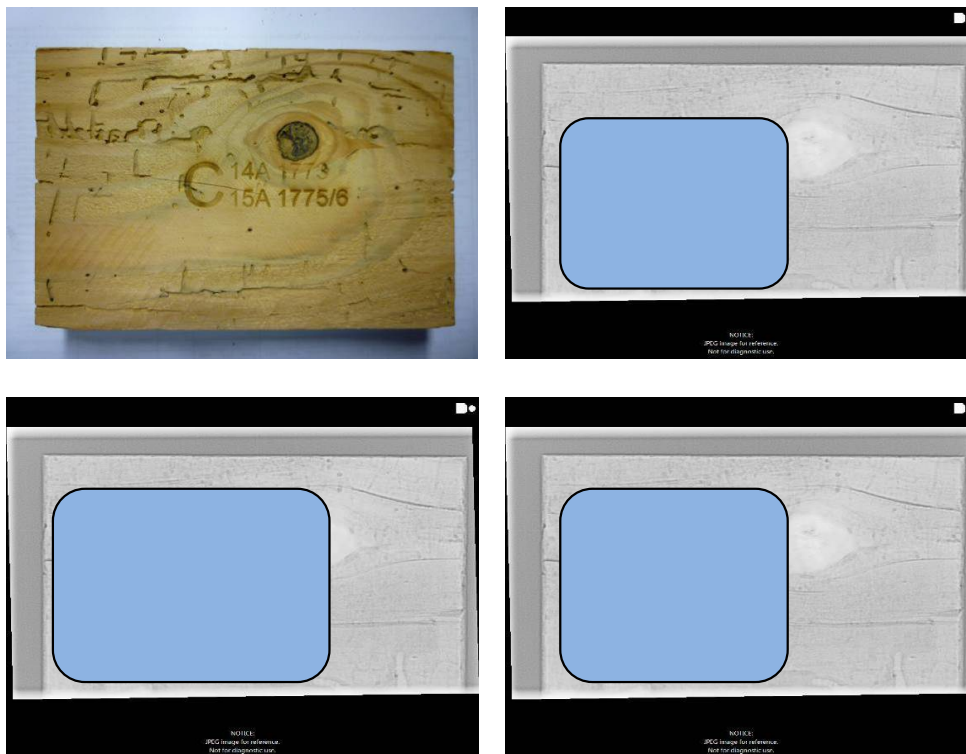


Obr. 8.6: Senzor rentgenového záření ve speciálním ochranném krytu



Obr. 8.7: Řídicí stanice v transportním kufru a PC technika s nainstalovaným softwarem

Vzorek byl podroben experimentálnímu měření 3x, a to přibližně po 30 vteřinách. Pro RTG snímání napadeného dřeva (vzorek C1) byly zvoleny expoziční parametry napětí anoda-katoda 40 kV a energie ozáření 12,5 až 50 mAs. Vzorek byl umístěn před senzor rentgenového záření, přibližně 35 cm od rentgenového přístroje. Na počítači, který je součástí transportního kufru, je nainstalován software (firma FOMEI a.s) pro rychlé zobrazení a základní úpravu RTG snímků.

Snímky vzorků C1 (RTG záření)

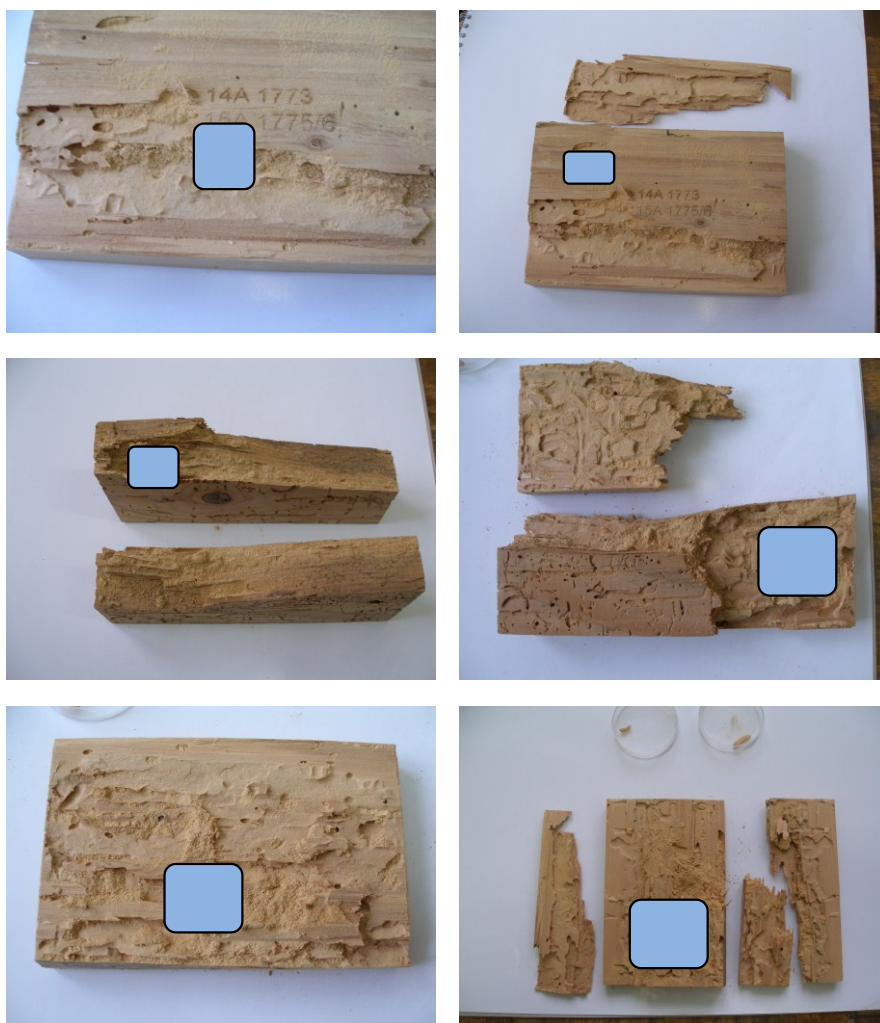
Obr. 8.8: Měřený vzorek a RTG snímky s patrným biotickým napadením larvami tesařika krovového

8.2.3 Destruktivní metoda štípání dřeva napadeného tesaříkem krovovým

Vyhodnocení napadení dřevokazným hmyzem je destruktivně prováděno štípáním vzorků a analýzou počtu a stavu nalezených larev. Zaznamená se počet mrtvých a umírajících larev, počet živých larev a počet nenalezených larev. Pokud jsou pochybnosti, zda jsou nalezené larvy živé nebo umírající, pak se tyto larvy vloží do neošetřených zkušebních těles a uloží se na 2 týdny do zkušební místnosti. Larvy, které se po této době nezahlodaly, se hodnotí jako mrtvé.

Vzorek C1 byl nejdříve příčně rozdělen na dvě užší tělesa o rozměrech cca 150 x 50 x 25 mm z důvodu suku o průměru 30 mm v ploše tělesa. Pak se ve štípání pokračovalo. Nejdříve byla polovina bez suku rozdělena na plátky. Už zde byly v chodbičkách některé larvy nalezeny. Plátky se pak dělily opatrně nožem a pomocí sekáčku na menší kousky a hledaly se další larvy. Podobně se pokračovalo i s druhou částí vzorku, který obsahoval suk. Dokumentace je uvedena na obr. 8.9.

Snímky vzorků C1 (destruktivní metoda)



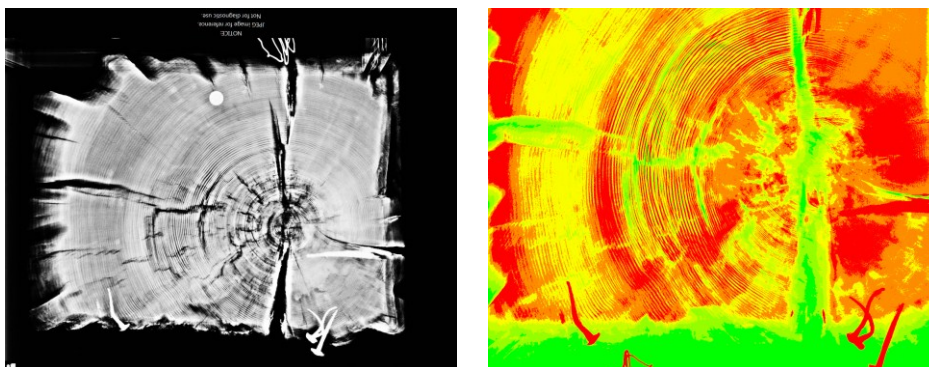


Obr. 8.9: Dokumentace postupu štípání vzorků a analyzování stavu larev tesaříka krovového

Pro praktické účely zkoumání stavu prvků historických objektů, zda jsou a v jakém rozsahu napadeny dřevokazným hmyzem, má největší uplatnění RTG záření. Destruktivní metoda a zkoumání stavu CT technikou je pro praktické účely zcela nevyhovující. Firma Thermo Sanace, s.r.o., je majitelem technického zařízení i softwaru RTG techniky. Úzce spolupracuje s ústavem teoretické a experimentální techniky VUT v Brně a s firmou FOMEI, a.s., na zlepšení techniky monitorování a získání co nejkvalitnějšího obrazu pro materiál, jakým je dřevo.

Vyvíjí program pro vytvoření přepočtového obrazu RTG snímku, který dle statistického zhodnocení v barevné škále zobrazí rozsah napadení, obr. 8.10. Cíleně vylepšuje jak zařízení, tak zejména metodiku práce s tímto systémem pro co nejlepší monitorování rozsahu poškození historických a památkově chráněných objektů, a to zejména krovové konstrukce.

Uvedené experimentální práce povedou k nedestruktivnímu, velmi přesnému a rychlému zhodnocení stavu konstrukce z hlediska biotického poškození, ale i z hlediska kvality provedené předcházející sanace pomocí horkého vzduchu. Výzkumné práce vedou ke zkvalitnění procesu sanace a celkově k posunu vývoje v nedestruktivních metodách.



Histogram:
 green color = 0, 255, 0, ; frequency = 234272 = 10.662783%
 light green color = 150, 254, 0, ; frequency = 133100 = 6.057985%
 the lightest green color = 200, 253, 0, ; frequency = 204335 = 9.300214%
 yellow color = 250, 252, 0, ; frequency = 527439 = 24.006144%
 orange color = 254, 140, 0, ; frequency = 698086 = 31.773064%
 red color = 255, 0, 0, ; frequency = 399868 = 18.199808%
 Total frequency= 2197100
 Image size= 1730x1270
 CRC sum is correct

Obr. 8.10: Vzorek dřeva snímáný RTG technikou s přepočtovým obrazem RTG snímku a histogramem

8.2.4 Významné publikované výsledky řešeného výzkumu

Publikované nebo recenzované původní vědecké práce s uvedenými abstrakty.

Release of Terpenes from Fir Wood during Its Long-term Use and in Thermal Treatment

Publikováno

Molecules 2012, 17, 9990-9999; doi:10.3390/molecules17089990, ISSN 1420-3049

F. Kačík, V. Veřková, P. Šmíra, A. Nasswetrová, D. Kačíková, L. Reinprecht

Abstract: Building structures from fir wood are often attacked by wood-destroying insects for which terpenes serve as attractants. One of the possibilities for extending the lifetime of structures is to use older wood with a lower content of terpenes and/or thermally modified wood. The study evaluated the quantity of terpenes in naturally aged fir wood (108, 146, 279, 287 and 390 years) and their decrease by thermal treatment (the temperature of 60 °C and 120 °C, the treatment duration of 10 h). Terpenes were extracted from wood samples by hexane and analyzed by gas-chromatography mass-spectrometry detection (GC-MS). The results indicate that recent fir wood contained approximately 60 times more terpenes than the oldest wood (186:3.1 mg.kg⁻¹). The thermal wood treatment speeded up the release of terpenes. The temperature of 60 °C caused a loss in terpenes in the recent fir wood by 62%, the temperature of 120 °C even by >99%. After the treatment by the temperature of 60 °C the recent fir wood had approximately such quantity of terpenes as thermally non-treated 108 years old wood, i.e. approximately 60-70 mg.kg⁻¹. After the thermal treatment at the temperature of 120 °C the quantity of terpenes dropped in the recent as well as the old fir wood to minimum quantities (0.7-1.1 mg.kg⁻¹). The thermal treatment can thus be used as a suitable method for the fir wood protection from wood-destroying insects.

Key words: terpenes, fir wood, thermal treatment, old wood

X-ray diagnostic of non-homogenous material by means of 2D plane transformation

Publikováno

*Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings, KL, MALAYSIA,
March 27-30, 2012. pp. 399-40. ISSN: 1559-9450*

P. Fiala, P. Koňas, M. Friedl, E. Kroutilová, P. Šmíra

Abstract: The issues of suitable diagnostic procedure for constructing material examination occur recently. The material of interest is the wood as a sort of heterogeneous materials. The important aspect of diagnostic procedure is the possibility of industrial application. A new diagnostic method based on X-ray imaging has been proposed and examined. The method is based on imaging information reduction into the 2D planar projection. It allows clearly to image the rate of material damage by means of displaying the weighted damage rate.

Thermal restoration applied to roof trusses in the presbytery of St. Martin's Cathedral in Bratislava

Publikováno

The Conference Wood and Fire Safety. 7th International Scientific Conference organised by University of Žilina, Faculty of Special Engineering, Department of Fire Engineering. 2012, s. 297-304. ISBN 978-80-87427-23-1

P. Šmíra, J. Štěpánek

Abstract: Heat and hot air do not necessarily have to be bad for wooden constructions. If used wisely, they can actually save them. This has been proven by the method called "thermal restoration". Its aim is to exterminate wood-destroying insects, living in the wood, by application of hot air (80°C - 120°C) which is blown into the restored space. Insects living in wooden constructions die as soon as the temperature, inside the restored wooden block, reaches 55°C. Thermal restoration is a promising method, popular especially with those making every effort to preserve the original look and material of historical objects. The actual method may be demonstrated on the restoration results of the priceless late-Gothic roof trusses in the presbytery of St. Martin's Cathedral in Bratislava. Its roof was infested with wood-destroying insects, namely the family Cerimbycidae (long-horned beetles).

Key words: hot air, extermination, non-destructive method, wood-destroying insects, historical objects

9 Summary

The Doctoral thesis analyzed the structure and properties of centuries old wood which was obtained from constructions of historical buildings in the region of the Beskydy Mountains with the recently cut wood. The prerequisite that technical properties and the structure of centuries old wood meet the requirements for secondary use in historical and monumentally protected constructions was confirmed on the basis of experimental measurements. No changes in the structure were observed in the analyses performed at the level of wood microstructure and chemical composition. Differences between the structure and selected old and reference wood properties were not confirmed. On the contrary, results of the performed analyses confirmed that wood which has undergone the aging process showed a lower content of hemicelluloses which significantly influenced wood sorption properties including its strength as the most unstable constituent. The lower content of hemicelluloses, the higher cellulose content which has a significant impact on the wood strength. Furthermore, old wood does not contain as many attractants as freshly cut wood, which decreases potential attack of such wood by wood-destroying insects.

An important part of the thesis focuses on wood exposure to thermal load at the temperature of 120° C, which is the maximum temperature for dry-heat maintenance of constructions. The wood exposure to these temperatures confirmed the previously stated hypotheses. The content of hemicelluloses further dropped resulting in lower dimensional stability. Substances causing attraction of wood-destroying insects were released faster at higher temperatures which resulted in higher biotic resistance. The stated method of dry-heat maintenance was thereby verified and thus also its effect on wooden structures.

It can be stated based on the aforementioned facts that the influence of wood age is not an important factor determining the possibility for secondary use of a material in constructions. Wood quality, particularly with regard to its biotic attack and its scope should be considered an important factor. Provided that the wood from historical buildings shows no signs of attack by wood-destroying insects or fungi, it is possible to use it again with the preserved important technical properties and resistance to high temperatures as well as new wood.

10 Seznam citované literatury

- [1] YOKOYAMA, M., GRIL, J., MATSUO, M., YANO, H., SUGIYAMA, J., KUBODERA, S., MISTUTANI, T., SAKAMOTO, M., OZAKI, H., IMAMURA, M., KAWAI, S. 2009: Mechanical characteristics of aged Hinoki wood from Japanese historical buildings. *Comptes Rendus Physique*, 10 (2009) 601-611.
- [2] POŽGAJ, A., CHOVANEC, D., KURJATKO, S., BABIAK, M. 1997: Štruktúra a vlastnosti dreva. Bratislava: Príroda a.s., 485 s. ISBN 80-07-00960-4
- [3] BENÁTSKÁ CHARTA, mezinárodní charta o zachování a restaurování památek a sídel, Benátky 1964. Vyhledávací služba Google 2012 [cit. 2012. 01.05]. Dostupné na www. <<http://www.restauro.cz/archiv/Bencharta.htm>>.
- [4] POPESCU, C. M., TIBIRNA, C. M., VASILE, C. 2009: XPS characterization of naturally aged wood. *Applied Surface Science* 256 (2009) 1355-1360
- [5] FENGEL, D., WEGENER, G. 2003: Wood – chemistry, ultrastructure, reactions. Verlag Kessel. 613 s. ISBN 3935638-39-6
- [6] INARI, G. N., PETRISSANS, J., LAMBERT, J. J., ERHARDT, P. 2006: GERARDIN, XPS characterization of wood chemical composition after heat-treatment, *Surf. Interf. Anal.* 38 (2006) 1336-1342
- [7] BLANCHETTE, R. A., NILSON, T., DANIEL, G., ABAD, A. R., 1990: Biological degradation of wood. In: Rowell, R.M., Barbour, R.J. (Eds), *Archeological Wood: Properties, Chemistry and Preservation. Advances in Chemistry Series 225*, American Chemical Society, Washington DC, 141-174
- [8] COLOM, X., CARRILLO, F., NOGUÉS, F., GARRIGA, P. 2002: Structural analysis of photodegraded wood by means of FTIR spectroscopy. *Polymer Degradation and Stability* 80, 543-549
- [9] ESTEBAN, L. G., GRIL, J., PALACIOS, P., GASASÚS, A.G. 2004: Reduction of wood hygroscopicity and associated dimensional response by repeated humidity cycles. Cátedra de Tecnología de la Madera. Departamento de Ingeniería Forestal Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, 1-34
- [10] ESTEBAN, L. G., FERNÁNDEZ, F. G., GASASÚS, A. G., PALACIOS, P., GRIL, J. 2005: Comparison of the hygroscopic behaviour of 205-year-old and recently cut juvenile wood from *Pinus sylvestris* L. INRA, EDP Sciences. *Ann. For. Sci.* 63 (2006) 309-317

-
- [11] FENGEL, D. 1991: Aging and fossilization of wood and its components. Wood Sci. Technol. 30, 153-77
- [12] KUČEROVÁ, I. 2005: Atmosférická koroze. Ústav chemické technologie restaurování památek Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. Koroze a ochrana materiálu 49(1) 9-12
- [13] ŠLEZINGEROVÁ, J., GANDELOVÁ, L. 2002: Stavba dřeva. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita MZLU Brno, 187 s. ISBN 80-7157-636-0
- [14] REINPRECHT, L. 2008: Ochrana dřeva. Technická univerzita vo Zvolene, 453 s. ISBN 978-80-228-1863-6
- [15] SOLÁR, R., REINPRECHT, L., KAČÍK, F., MELCER, I., HORSKÝ, D. 1987: Comparison of some physico-chemical and chemical properties of carbohydrate and lignin part of contemporary and subfossil oak wood. Cellulose Chem. Technol., 21, 513-524
- [16] HOFFMANN, P., PEEK, R. D., PULS, J., SCHWAB, E. 1986: Das Holz der Archäologen: Untersuchungen an 1600 Jahre alten wassergesättigten Eichenholz der „Mainzer Römerschiffe“. Holz Roh- Werkst. 44, 241-247
- [17] BOROVNIKOV, A. M., RVANINA, A.M. 1973: Unified method of determining the limit of hygroscopicity of wood, Lesnoi Zhurnal, USSR, 16 (6), 168-169
- [18] CHUDINOV, B. S., ANDREEV, M. D. 1978: Hygroscopicity of wood at temperatures below zero degrees centigrade. 2. The condition of the hygroscopic moisture and the equilibrium moisture content, Leipzig, VEB Fachbuchverlag, Holztechnologie, 19 (3) 147-151
- [19] SKAAR, C. 1988: Wood-water relations. Springer – Verlag, 283 s.
- [20] KRUTUL, D. 1979: Sorption and desorption of the *Entandophragma* sp. Wood after extraction with selected organic solvents, Zeszyty naukowe, Technologia drewna, Akademia Rolnicza w. Warszawie 10, 19-33
- [21] SIAU, J. F. 1995: Wood: Influence of Moisture on Physical Properties. Virginia Polytechnic Institute and State University, 227 s.
- [22] DJOLANI, B. 1972: Hystérèse et effets de second ordre de la sorption d'humidité dans le bois aux températures de 5, 21, 35, 50 °C, Ann. wood, For. Sci. 29, 50-356
- [23] CHANG, H.T. CHANG, S.T. 2002: Moisture excluding efficiency and dimensional stability of wood improved by acylation, Bioresource Technol. 85, 201-204

- [24] MIHRANYAN, A. 2004: Moisture sorption by cellulose powders of varying crystallinity, *Int. J. Pharm.*, 269, 433-442
- [25] VIEL, S., CAPITANI, D., PROETTI, N., ZIARELLI, F., SEGRE, A. L. 2004: NMR spectroscopy applied to the Cultural Heritage: a preliminary study on ancient wood characterisation, *Appl. Phys A Mater.*, 79, 357-361
- [26] ŠMÍRA, P. 2010: Likvidace dřevokazného hmyzu horkým vzduchem. In: Sborník k semináři Horkovzdušná sterilizace dřeva – předpoklady, zkušenosti, provádění. Kozlovice: Areál fojtství Kozlovice, 67 – 81, ISBN: 978-80-874-2702-6
- [27] ŠMÍRA, P., ŠTĚPÁNEK, J. 2010: Horkovzdušná sanace krovu Horního kostela ve Velké Lhotě u Dačic. In: Sanace a rekonstrukce staveb 2010, sborník odborných příspěvků k 32. konferenci (12. konference WTA CZ). Brno: VUT v Brně, Fakulta stavební, 61-67
- [28] ŠMÍRA, P., ŠTĚPÁNEK, J. 2011: Termosanace – horkovzdušná sanace dřevokazným hmyzem napadených dřevěných konstrukcí a její praktické využití na příkladě Horního kostela ve Velké Lhotě u Dačic. In: Sborník k semináři Historické krovky a nové možnosti jejich zachování. Olomouc: Muzeum umění Olomouc, 2-21, ISBN: 978-80-87427-10-1
- [29] ŠMÍRA, P., ŠTĚPÁNEK, J. 2011: Termosanace – likvidace dřevokazného hmyzu horkým vzduchem. In: Zborník príspevkov k IV. konferencii s medzinárodnou účasťou DREVOSTAVBY, Žilinská univerzita v Žiline. Terchová: hotel Boboty, 2011, ISBN: 978-80-970171-9-4
- [30] REINPRECHT, L. 1996: Procesy degradácie dreva. 1. Vydanie, TU Zvolen, 156 s.
- [31] REINPRECHT, L., VIDHOLDOVÁ, Z. 2011: Termodrevo, Thermowood. Technická univerzita vo Zvolenu. ŠMÍRA-PRINT, s.r.o., 89 s. ISBN 978-80-87427-05-7
- [32] KAČÍK, F., KAČÍKOVÁ, D., GIERTLOVÁ, Z: Chemical and physico-chemical changes of lignin, cellulose, and hemicelluloses during thermal degradation of wood. In: Wood and Fire Safety 2000, Proceedings – Part I, 4th International Scientific Conference, The High Tatras, Slovakia, May 14-19, 2000, 143-150
- [33] KAČÍK, F., SOLÁR, R. 2000: Analytická chémia dreva, TU Zvolen, 369 s. ISBN 80-228-0882-0
- [34] MILITZ, H. 2002: Thermal treatment of wood-European processes and their background. IRG/WP/02-40241, 20 s. In: Reinprecht, L., Vidholdová, Z. (Eds).

- Termodrevo, Thermowood. Technická univerzita vo Zvolene. ŠMÍRA-PRINT, s.r.o., 89 s. ISBN 978-80-87427-05-7
- [35] HALE, M. D., GHOSH, S. C., SPEAR, M. J. 2005: Effect of artificial UV weathering and soft rot decay on heat treated wood. IRG/WP/05-40302, 13 s. In: Reinprecht, L., Vidholdová, Z.(Eds). Termodrevo, Thermowood. Technická univerzita vo Zvolene. ŠMÍRA-PRINT, s.r.o., 89 s. ISBN 978-80-87427-05-7
- [36] WANG, J., COOPER, P. A. 2005: Properties of hot oil treated wood and the possible chemical reactions between wood and soybean oil during heat treatment. IRG/WP/05-40304, 11 s. In: Reinprecht, L., Vidholdová, Z.(Eds). Termodrevo, Thermowood. Technická univerzita vo Zvolene. ŠMÍRA-PRINT, s.r.o., 89 s. ISBN 978-80-87427-05-7
- [37] OBATAY, E., TANAKA, F., NORIMOTO, M., TOMITA, B. 2000: Hygroscopicity of heat-treated wood: I. Effects of after-treatments on the hygroscopicity of heat-treated wood, Mokuzai Gakkaishi 46, 77-78
- [38] KÚDELA, J. 2005: Vlhkostné a tepelné namáhanie bukového dreva. TU Zvolen, 141 s.
- [39] KYNCL, T., RYBNÍČEK, M., DVORSKÁ, J. 2003: Dendrochronologie. Vyhledávací služba Google 2012 [cit. 2012. 11.11]. Dostupné na [www.<http://www.restauro.cz/archiv/Bencharta.htm>](http://www.restauro.cz/archiv/Bencharta.htm).
- [40] COOK, E.R., KAIRIUKSTIS, L.A. 1990: Methods of dendrochronology. Kluwer Acad. Publ., Dodrecht - Boston - London.
- [41] ÚRADNÍČEK, L., MADĚRA, P., TICHÁ, S., KOBLÍŽEK, J. 2009: Dřeviny České republiky. LDF MZLU Brno, Copyright. ISBN 978-80-87154-62-5
- [42] ŠTĚPÁNEK, J., KUČA, K. 2007: Města a městečka v Čechách, na Moravě a ve Slezsku, Libri, Praha 2000 a M. Makowski: Šlechtická sídla na Těšínském Slezsku. Vyhledávací služba Google 2012 [cit. 2012. 12.06]. Dostupné na [www. <http://www.hrady.cz/index.php?OID=2005.htm>](http://www.hrady.cz/index.php?OID=2005.htm)
- [43] ŠTĚPÁNEK, J., TICHÁNEK, J., ŠERÝ, Z. 2007: Šlechtická sídla na Novojičínsku, Butterfly, Opava 2003. Vyhledávací služba Google 2012 [cit. 2012. 12.06]. Dostupné na [www. <http://www.hrady.cz/index.php?OID=4050.htm>](http://www.hrady.cz/index.php?OID=4050.htm)
- [44] ŠTĚPÁNEK, J. 2006: Velká Polom. Vyhledávací služba Google 2012 [cit. 2012. 12.06]. Dostupné [www.<http://www.hrady.cz/index.php?OID=1854.htm>](http://www.hrady.cz/index.php?OID=1854.htm).
- [45] VINAŘ, J. 2010: Historické krovy. Typologie, průzkum, opravy. Grada Publishing, a.s., Praha. První vydání, 448 s. ISBN 978-80-247-3038-7

- [46] MUZIKA, R-M, CAMPBELL, C. L., HANOVER, J. W., SMITH, A. L. 1990: Comparison of Techniques for Extracting Volatile Compounds from Conifer Needles. *Journal of Chemical Ecology*. 16(9): 2713-2722
- [47] BOWMAN, J. M., BRAXTON, M. S., CHURCHILL, M. A., HELLIE, J. D., STARRETT, S. J., CAUSBY, G. Y., ELLIS, D. J., ENSLEY, S. D., MANESS, S. J., MEYER, C. D., SELLERS, J. R., HUA, Y., WOOSLEY, R. S., BUTCHER, D. J. 1997: Extraction Method for the Isolation of Terpenes from Plant Tissue and Subsequent Determination by Gas Chromatography. *Microchemical Journal* 56, (1997)10–18
- [48] MARTIN-BENITO, D., GARCIA-VALLEJO, M. C., PAJARES, J. A., LÓPEZ, D. 2005: Triterpenes in elms in Spain. *Canadian Journal of Forest Research* 35: 199-205
- [49] TUMEN, H. HAFIZOGLU, A. KILIC, I. E. DONMEZ, H. SIVRIKAYA AND M. REUNANEN 2010: Yields and constituents of essential oil from cones of Pinaceae spp. natively grown in Turkey, *Molecules*, 15 (8) 5797-5806
- [50] JERKOVIĆ, I, MARIJANOVIĆ, Z., MALENICA-STAVAR, M., LUŠIĆ, D. 2010: Volatiles from a Rare Acer spp. Honey Sample from Croatia. *Molecules* 2010 (15) 4572-4582
- [51] GAO, B., CHEN, Y., ZHANG, M., XU, Y., SIYI PAN, S. 2011: Chemical Composition, Antioxidant and Antimicrobial Activity of Pericarpium Citri Reticulatae Essential Oil. *Molecules* 2011 (16) 4082-4096
- [52] VELES, P. 1989: Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov. 2. vyd. Bratislava – Praha: Alfa, SNTL, 408 s.
- [53] LECLERCQ, A. 1980: Influence of beech wood anatomical features upon its physico-mechanical properties. *Forst-u Holzwirt.*, (131): 33–47
- [54] BITVINSKAS, T.T. 1974: Dendroclimatological Investigations. *Gidrometeoizdat*, Lithuanian Institute of Botany, Vilnius, 3-11
- [55] KYNCL, J. 2005: Dendrochronologické datování dřeva. In: Vinař a kol.: Historické krovy II. Grada, 156-170.
- [56] HOLLSTEIN, E. 1980: Mitteleuropäische Eichenchronologie. *Trierer Grabungen und Forschungen*. Mainz a Rh., Trierer Grabungen und Forschungen 11, 273 s.
- [57] BAILLIE, M.G.L., PILCHER, J.R. 1973: A simple Gross–dating Program for Tree–Ring Research. *Tree Ring Bulletin*, 33, 7–14

- [58] SEIFERT, V. K. 1956: Über ein neues Verfahren zur Schnellbestimmung der Rein-Cellulose. Das Papier. 1956, 301-306
- [59] WISE, L. E., MURPHY, M., D'ADDIECO, A. A. 1946: Chlorite holocellulose, its fractionation and bearing on summative wood analysis and on studies on the hemicelluloses. Paper Trade J., 122, (3), 1946, s. 35 - 43
- [60] KAČÍK, F., SOLÁR, R., BALOGHOVÁ, D. 1995: Analysis of lignin nitrobenzene oxidation products by high performance liquid chromatography (HPLC). Drevársky výskum, 1995, 40, 13-20
- [61] KAČÍK, F., KAČÍKOVÁ, D., JABLONSKÝ, M., KATUŠČÁK, S. 2009: Cellulose Degradation in the Process of Newsprint Paper Ageing. In Polymer Degradation and Stability, 2009, 94 (9) 1509-1514
- [62] VALTASAARI L, SAARELA K. 1975: Determination of chain length distribution of cellulose by gel permeation chromatography using the tricarbanilate derivative. Pap Puu – Pap Och Tra 1975; 1:5–10
- [63] MELOUN M., MILITKÝ J., 2002: Kompendium statistického zpracování dat. Academia, nakladatelství Akademie věd České republiky, 764 s. ISBN 80-200-1008-4
- [64] VINAŘ, J., KYNCL, J., RUŽICKA, P., ŽÁK J. 2005: Historické krovy II. – průzkumy a opravy, Grada, Praha, 301 s.
- [65] STONE, B. 1963: Statistické metody v lesnictví. SZN, Praha, 250 s.
- [66] SCHWEINGRUBER, F.H., 1990: Microscopic wood anatomy. 3. ed. Bir-mensdorf, WSL. 226 s.
- [67] KYNCL, T. 2010: Dendrochronologické datování dřevěných konstrukčních prvků zámku v Rychvaldě. Výzkumná zpráva č. 122-10, s. 10
- [68] KYNCL, T. 2010: Dendrochronologické datování dřevěných konstrukčních prvků pivovaru a lihovaru u zámku v Rychvaldě (okr. Karviná). Výzkumná zpráva č. 121b-10, s. 6
- [69] KYNCL, T. 2010: Dendrochronologické datování dřevěných konstrukčních prvků domu čp. 691 v Palkovicích (okr. Frýdek-Místek). Výzkumná zpráva č. 121a-10, s. 6

-
- [70] KYNCL, T. 2010: Dendrochronologické datování dřevěných konstrukčních prvků domu čp. 57 v Bernarticích (okr. Nový Jičín). Výzkumná zpráva č. 121c-10, s. 6
 - [71] KYNCL, T. 2008: Dendrochronologické datování dřevěných konstrukčních prvků sýpky u tvrže ve Velké Polomi (okr. Ostrava). Výzkumná zpráva č. 109-08, s. 14
 - [72] Banerjee, S. 2001: Mechanism of terpene release during sawdust and flake drying. *Holzforschung*, 55 (4): 413 - 416
 - [73] SANDAK, A., SANDAK, J., ZBOROWSKA, M., PRADZYNSKI, W. 2010: Near infrared spectroscopy as a tool for archaeological wood characterization. *Journal of Archaeological Science* 37 (2010) 2093-2101
 - [74] SCHWARZ, E. C. A., TIMELL, T. E. 1963: Characterization Of Three Hemicelluloses From The Wood Of Amabilis Fir (*Abies Amabilis*). *Canadian Journal of Chemistry*. 41, 1963 (6), 1381-1388
 - [75] KURJATKO, S., JANOTA, I., RAJČAN, J., TOKOŠOVÁ, M. 1978: Prieskum pevnosti v tlaku bukového dreva. *Drevársky výskum*. 23 (3) 129–144
 - [76] REGINÁČ *a kol.* 1990: *Náuka o dreve II*. 5. ed. Zvolen: Edičné stredisko VŠLD, 1990, 402 s.
 - [77] KÚDELA, J. 1990: Vplyv vlhkosti a teploty na mechanické vlastnosti bukového dreva. [Kandidátska dizertácia]. Zvolen: VŠLD, Drevárska fakulta, 1990, 150 s.
 - [78] KÚDELA, J. 2010: Mechanické vlastnosti dreva. In: *Parametre kvality dreva určujúce jeho finálne použitie* (Ed.: Kurjatko, S.). Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2010, 101–127, 352 s. ISBN 978-80-228-2095-0
 - [79] UGOLEV, B. N. 2007: *Drevesinovedenie i lesnoe tovarovedenie*. Moskva: Izdatel'stvo Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa, 351 s.
 - [80] PISSIALIS, C. 1997: Physico-chemical characteristics of waterlogged archeological wood, *Holzforschung* 51, 111-113
 - [81] SCHWIENGRUBER, F. H. 1990: *Anatomy of European Woods*: Paul Haupt Berne and Stuttgart, 800 s. ISBN 3-258-04258-6
 - [82] NILSON, T., DANIEL, G. 1990: Structure and Aging process of Dry Archeological Wood. In: *Archeological wood. Properties, chemistry and Preservation*.

-
- Ed. Rowell, R.M. – Barbour, R. J. American Chemical Society, Washington, 1990, 67-86. ISBN 0-8412-1623-1
- [83] ZIMMERMANN, M. H. 1983: Xylem Structure and the Ascent of Sap. Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, 1983, 143 s. ISBN 3-540-12268-0
- [84] ČERMÁK, J. 1987: Monoterpene hydrocarbon contents of the resin from seeds of silver fir (*Abies alba* Mill.). Trees - Structure and Function, 1 (2) 94-101
- [85] SUTTON, B. A., WOOSLEY, R. S., DAVID J. BUTCHER, D. J. 1997: Determination of Monoterpenes in Oleoresin: A Chemosystematic Study of the Interaction between Fraser Fir (*Abies fraseri*) and Balsam Woolly Adelgid (*Adelges piceae*). Microchemical Journal 56, (1997), 332–342
- [86] TUMEN, H., HAFIZOGLU, A., KILIC, I. E., DONMEZ, H., SIVRIKAYA, M., REUNANEN 2010: Yields and constituents of essential oil from cones of Pinaceae spp. Natively grown in Turkey, Molecules, 15 (8) 5797-5806
- [87] MANNINEN, A. M., TARHANEN, S., VUORINEN, M., KAINULAINEN, P. 2002: Comparing The Variation Of Needle And Wood Terpenoids In Scots Pine Provenances. Journal of Chemical Ecology, 28 (1) 211-228
- [88] GRANSTRÖM K. M., 2009: Emissions of sesquiterpenes from spruce sawdust during drying. Eur. J. Wood Prod. (2009) 67: 343–350
- [89] RUPAR, K., SANATI, M. 2005: The release of terpenes during storage of biomass. Biomass and Bioenergy 28 (2005) 29–34
- [90] McDonald A. G., WASTNEY, S. 1995: Analysis of volatile emissions from kiln drying of radiata pine. In: Proc. of the 8th Inter. Symposium on Wood and Pulping Chemistry. Vol.3., Helsinki. 434-436
- [91] PETERS, J., FISCHER, K., FISCHER, S. 2008: "Characterization of emissions from thermally modified wood and their reduction by chemical treatment," Bio-Res. 3(2), 491-502
- [92] NERG, A. M., HEIJARI, J., NOLDT, U., VIITANEN, H., VUORINEN, M., KAINULAINEN, P., HOLOPAINEN, J. K. 2004: Significance of Wood Terpenoids in the Resistance of Scots Pine Provenances Against the Old House Borer, *Hylotrupes Bajulus*, and Brown-Rot Fungus, *Coniophora Puteana*. Journal of Chemical Ecology, Vol. 30, No. 1, 125-140

- [93] FETTKÖTHER, R., REDDY, G.V.P., NOLDT, U., DETTNER, K. 2000: Effect of host and larval frass volatiles on behavioural response of the old-house borer *Hylotrupes bajulus* (L) (Coleoptera: Cerambycidae), in a wind tunnel bioassay. *Chemoecology* 10:1–10
- [94] HIGGS, M. D., EVANS, D. A. 1978: Chemical mediators in the oviposition behaviour of the house longhorn beetle, *Hylotrupes bajulus*. *Experientia*, 34: 46–47
- [95] BORGIN, K., PARAMESWARAN, N., LIESE, W. 1975: The effect of aging on the ultrastructure of wood. *Wood Sci. Technol.* 9, 87-98
- [96] ZBOROWSKA, M., PRADZYNSKI, W., WALISZEWSKA, B., SPEK-DYWIGALA, A. 2009: Basic chemical composition of 2700 year old archaeological hardwood and softwood from Biskupin. *The State and Preservation Perspectives of the Biskupin Wood* (Babinski L. ed.), Archaeological Museum in Biskupin, Biskupin, 175-187, ISBN 83-915490-9-7
- [97] COLOMBINI, M. P., JEANNETTE J. LUCEJKO, J. J., MODUGNOA, F., ORLANDI, M., TOLPPA E. L., LUCA ZOIA, L. 2009: A multi-analytical study of degradation of lignin in archaeological waterlogged wood. *Talanta* 80 (2009) 61–70
- [98] SOLÁR, R., REINPRECHT, L., KAČÍK, F., MELCER, J., HORSKÝ, D., 1987: Comparison of some physicochemical and chemical properties of carbohydrates and lignin part of contemporary and subfossil oak wood. *Cellulose Chemistry and Technology* 21 (5), 513-524
- [99] BORGIN, K., FAIX, O., SCHWEERS, W. 1975B: The effect of aging on lignins of wood. *Wood Sci. Technol.* 9, 207-211
- [100] NILSSON, T., ROWELL, R. 2009: Historical wood – structure and properties. In: *Wood Science for Conservation of Cultural Heritage* (L. Uzielli ed.), Firenze University Press, 11-15
- [101] TSUCHIKAWA, S., YONENOBU, H., SIESLER, H. W., 2005: Near-infrared spectroscopic observation of the ageing process in archaeological wood using a deuterium exchange method. *The Analyst* 130, 379-384
- [102] KÚDELA, J. 1983: Drevokazná huba *Heterobasidion annosus* (Fr.) Bref. a jej vplyv na hustotu smrekového dreva. In: *Hniloby lesných drevín a ochrana proti nim*. Brno, DT ČSVTS České Budějovice 1983, 35–43
- [103] LEXA, J., NEČESANÝ, V., PACLT, J., TESAŘOVÁ, M., ŠTOFKO, J. 1952: *Mechanické a fyzikálne vlastnosti dreva*. Bratislava: Práca – ROH, 436 s.

- [104] PERELYGIN, L. M. 1965: Náuka o dreve. 2. ed. BRATISLAVA: SVTL 1965, 448 s.
- [105] WAGENFÜHR, R. 2007: Holzatlas. Holzatlas. 6. vyd., Leipzig: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 816 s.
- [106] BODIG, J., JAYNE, B. A. 1982: Mechanics of wood and wood composites. New York, Cincinnati, Toronto, London, Melbourne, Van Nostrand: Reinhold Company, 712 s. ISBN

Použité normy

- ČSN 49 0123 (ST SEV 830-77) Drevo. Štatistická metóda odberu vzorek. ÚNM Praha 1980
- ČSN 49 0101 Drevo. Všeobecné požiadavky na fyzikálne a mechanické skúšky. ÚNM Praha 1980
- ČSN 49 0116 (ST SEV 1142-78) Drevo. Zisťovanie pevnosti dreva v ohybe. ÚNM Praha 1969
- ČSN 49 0110 (ST SEV 816-77) Drevo. Medza pevnosti v tlaku v smeru vlákien. ÚNM Praha 1980
- ČSN 49 0113 (490113) Skúšky vlastností rastlého dreva. Metóda zisťovania pevnosti v ťahu pozdĺž vlákien. ÚNM Praha 1980
- ČSN 49 0118 (490118) Drevo. Medza pevnosti v šmyku v smere vlákien. ÚNM Praha 1980
- ČSN 49 0103 (ST SEV 387-76) Drevo. Zjišťování vlhkosti při fyzikálních a mechanických zkouškách. ÚNM Praha 1979
- ČSN 49 0108 (ST SEV 388-76) Drevo. Zjišťování hustoty při fyzikálních a mechanických zkouškách. ÚNM Praha 1979
- ČSN EN ISO 12571 (730575) Tepelně vlhkostní vlastnosti stavebních materiálů a výrobků - Stanovení hygroscopických sorpčních vlastností. ÚNM Praha 2001
- STN EN 45501 (994102) Metrologické aspekty váh s neautomatickou činností. 1995
- ASTM D 1106-96: 2007 Standard Test Method for Acid-Insoluble Lignin in Wood.
- ASTM D 1107-96: 2007 Standard Test Methods for Water Solubility of Wood.
- ASTM E 1758-01: 2003 Determination of Carbohydrates in Biomass by HPLC.
- EN 350-1 Trvanlivost dřeva a materiálů na jeho bázi. Přirozená trvanlivost rostlého dřeva. Část 2: Návod na zkoušení a klasifikaci přirozené trvanlivosti dřeva

11 Přílohy

11.1 Hodnoty rovnovážných vlhkostí dřeva při sorpci a desorpci

V tabulkových přílohách 11.1–11.4 jsou zaznamenány hodnoty rovnovážných vlhkostí dřeva při sorpci a desorpci stanovených pro 5 bodů relativní vzdušné vlhkosti při konstantní teplotě 20 °C za normálního atmosférického tlaku. Hodnoty rovnovážné vlhkosti dřeva při sorpci a desorpci byly vypočítány dle vztahu 5.1 z gravimetricky naměřených hodnot hmotností zkušebních vzorků. V tabulkách jsou uvedeny hodnoty pro dřevo staré a referenční.

Tab. 11.1: Hodnoty rovnovážné vlhkosti dřeva ze 17. stol. při sorpci

| Sorpci | Relativní vlhkost vzduchu ϕ [%] | | | | |
|--------|--|------|-------|-------|-------|
| | 33 | 55 | 75 | 88 | 97 |
| n | Rovnovážná vlhkost dřeva (17. stol.) RVD [%] | | | | |
| 1 | 7,87 | 8,86 | 12,45 | 18,19 | 23,97 |
| 2 | 7,96 | 8,87 | 13,18 | 17,53 | 25,04 |
| 3 | 8,17 | 8,96 | 12,54 | 16,67 | 25,83 |
| 4 | 7,87 | 8,83 | 12,52 | 18,99 | 23,53 |
| 5 | 8,75 | 8,98 | 13,07 | 18,22 | 24,89 |
| 6 | 7,84 | 8,78 | 12,53 | 17,89 | 25,58 |
| 7 | 7,93 | 8,90 | 13,04 | 17,70 | 24,37 |
| 8 | 7,71 | 8,91 | 11,82 | 15,37 | 25,45 |
| 9 | 7,95 | 8,49 | 12,66 | 17,50 | 25,28 |
| 10 | 7,52 | 8,96 | 11,20 | 16,87 | 24,57 |
| 11 | 7,61 | 9,21 | 13,02 | 17,62 | 26,56 |
| 12 | 7,50 | 9,06 | 12,72 | 17,14 | 25,88 |
| 13 | 7,32 | 9,05 | 12,25 | 18,82 | 24,35 |
| 14 | 7,69 | 8,80 | 12,98 | 17,08 | 25,20 |

| | | | | | |
|-----------|------|------|-------|-------|-------|
| 15 | 7,56 | 8,45 | 13,13 | 17,84 | 24,68 |
| 16 | 7,98 | 9,18 | 12,86 | 17,75 | 25,83 |
| 17 | 7,37 | 8,41 | 13,15 | 17,92 | 25,68 |
| 18 | 8,12 | 8,90 | - | - | - |
| \bar{x} | 7,82 | 8,87 | 12,89 | 17,59 | 25,10 |
| S_x | 0,34 | 0,22 | 0,51 | 0,84 | 0,79 |
| V_x [%] | 4,32 | 2,53 | 3,98 | 4,78 | 3,13 |

* \bar{x} - aritmetický průměr, S_x – směrodatná odchylka, V_x – variační koeficient

Tab. 11.2: Hodnoty rovnovážné vlhkosti dřeva ze 17. stol. při desorpce

| Desorpce | Relativní vlhkost vzduchu ϕ [%] | | | | |
|----------|--|-------|-------|-------|-------|
| | 33 | 55 | 75 | 88 | 97 |
| n | Rovnovážná vlhkost dřeva (17. stol.) RVD [%] | | | | |
| 1 | 10,55 | 10,15 | 16,62 | 23,09 | 30,95 |
| 2 | 10,92 | 11,59 | 16,85 | 23,88 | 31,75 |
| 3 | 10,76 | 10,56 | 17,01 | 20,96 | 31,29 |
| 4 | 10,33 | 10,75 | 16,74 | 22,04 | 31,21 |
| 5 | 10,14 | 10,49 | 15,98 | 22,85 | 31,03 |
| 6 | 10,41 | 11,61 | 15,49 | 22,71 | 31,23 |
| 7 | 10,47 | 11,33 | 15,67 | 21,30 | 30,65 |
| 8 | 10,08 | 11,09 | 15,41 | 20,64 | 31,03 |
| 9 | 10,36 | 11,04 | 15,19 | 22,08 | 31,30 |
| 10 | 10,18 | 10,87 | 16,03 | 21,81 | 31,03 |
| 11 | 10,07 | 11,62 | 16,15 | 22,05 | 32,07 |
| 12 | 10,60 | 11,30 | 16,19 | 22,93 | 31,03 |
| 13 | 10,44 | 11,16 | 13,48 | 22,50 | 31,86 |
| 14 | 9,69 | 11,23 | 16,72 | 23,18 | 32,88 |
| 15 | 10,71 | 11,34 | 16,57 | 22,41 | 31,17 |
| 16 | 9,15 | 10,59 | 16,19 | 23,02 | 29,80 |

| | | | | | |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 17 | 10,74 | 11,06 | 16,55 | 23,23 | 30,00 |
| 18 | 10,30 | 11,23 | - | - | - |
| \bar{x} | 10,33 | 11,06 | 15,58 | 21,39 | 31,19 |
| S_x | 0,42 | 0,42 | 0,83 | 0,87 | 0,72 |
| V_x [%] | 4,06 | 3,76 | 5,33 | 4,05 | 2,30 |

* \bar{x} - aritmetický průměr, S_x – směrodatná odchylka, V_x – variační koeficient

Tab. 11.3: Hodnoty rovnovážné vlhkosti dřeva referenčního (21. stol.) při sorpci

| Sorpce | Relativní vlhkost vzduchu ϕ [%] | | | | |
|-----------|---|------|-------|-------|-------|
| | 33 | 55 | 75 | 88 | 97 |
| n | Rovnovážná vlhkost referenčního dřeva RVD [%] | | | | |
| 1 | 8,72 | 9,66 | 14,50 | 20,51 | 27,06 |
| 2 | 9,20 | 9,67 | 12,55 | 19,67 | 26,74 |
| 3 | 8,79 | 9,71 | 15,04 | 20,59 | 28,68 |
| 4 | 8,90 | 9,32 | 14,49 | 19,47 | 27,24 |
| 5 | 8,41 | 9,66 | 15,20 | 20,79 | 27,93 |
| 6 | 8,19 | 9,79 | 16,00 | 18,37 | 27,43 |
| 7 | 8,49 | 9,21 | 14,01 | 19,03 | 28,74 |
| 8 | - | - | - | 19,86 | 26,83 |
| \bar{x} | 8,67 | 9,57 | 14,54 | 19,79 | 27,58 |
| S_x | 0,34 | 0,22 | 1,08 | 0,84 | 0,79 |
| V_x [%] | 3,91 | 2,27 | 7,46 | 4,22 | 2,86 |

* \bar{x} - aritmetický průměr, S_x – směrodatná odchylka, V_x – variační koeficient

Tab. 11.4: Hodnoty rovnovážné vlhkosti dřeva referenčního (21. stol.) při desorpci

| Desorpce | Relativní vlhkost vzduchu ϕ [%] | | | | |
|-----------|---|-------|-------|-------|-------|
| | 33 | 55 | 75 | 88 | 97 |
| n | Rovnovážná vlhkost referenčního dřeva RVD [%] | | | | |
| 1 | 11,74 | 12,96 | 17,88 | 23,26 | 34,32 |
| 2 | 12,31 | 12,97 | 17,66 | 24,51 | 33,82 |
| 3 | 11,84 | 12,91 | 17,58 | 24,52 | 32,62 |
| 4 | 11,63 | 12,56 | 17,43 | 24,06 | 33,53 |
| 5 | 11,85 | 12,64 | 17,51 | 24,37 | 33,73 |
| 6 | 11,50 | 13,05 | 18,12 | 23,04 | 33,03 |
| 7 | 11,93 | 13,03 | 17,58 | 24,36 | 34,18 |
| 8 | - | - | - | 24,89 | 34,57 |
| \bar{x} | 11,83 | 12,88 | 17,68 | 24,13 | 33,73 |
| S_x | 0,26 | 0,19 | 0,24 | 0,65 | 0,66 |
| V_x [%] | 2,16 | 1,51 | 1,35 | 2,68 | 1,95 |

* \bar{x} - aritmetický průměr, S_x – směrodatná odchylka, V_x – variační koeficient

11.2 Data z chemické analýzy dřeva

V tab. 11.5–11.9 jsou uvedeny hodnoty neutrálních monosacharidů, molekulové hmotnosti a polydisperzity holocelulózy, hemicelulózy, celulózy a ligninu, s uvedenými základními statistickými charakteristikami. V tab. 11.9 jsou uvedeny hodnoty krystalinity celulózy při daných poměrech absorbancí.

Tab. 11.5: Hodnoty neutrálních monosacharidů ve vzorcích jednotlivých skupin jedlového dřeva s uvedenými základními statistickými charakteristikami

| vzorek | GLC | XYL | GAL | ARA | MAN | SUMA |
|-----------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|
| A | 61,042 | 3,203 | 0,496 | 0,978 | 12,610 | 78,329 |
| A | 60,662 | 3,021 | 0,545 | 1,027 | 12,539 | 77,795 |
| A | 60,349 | 3,097 | 0,695 | 0,986 | 13,565 | 78,692 |
| A | 60,260 | 3,084 | 0,652 | 0,893 | 13,561 | 78,451 |
| \bar{x} | 60,58 | 3,10 | 0,60 | 0,97 | 13,07 | 78,317 |
| S_x | 0,35 | 0,08 | 0,09 | 0,06 | 0,57 | 0,38 |
| V_x [%] | 0,585 | 2,434 | 15,450 | 5,775 | 4,372 | 0,484 |
| B | 56,46 | 4,23 | 0,93 | 1,46 | 12,91 | 75,99 |
| B | 56,56 | 4,25 | 1,07 | 1,46 | 12,98 | 76,32 |
| B | 56,86 | 4,32 | 0,83 | 1,36 | 14,04 | 77,41 |
| B | 56,85 | 4,32 | 0,86 | 1,30 | 14,05 | 77,38 |
| \bar{x} | 56,68 | 4,28 | 0,92 | 1,39 | 13,50 | 76,77 |
| S_x | 0,20 | 0,05 | 0,11 | 0,08 | 0,64 | 0,73 |
| V_x [%] | 0,354 | 1,133 | 11,719 | 5,704 | 4,725 | 0,949 |
| C | 58,56 | 3,54 | 0,54 | 1,68 | 14,76 | 79,08 |
| C | 58,49 | 3,55 | 0,49 | 1,66 | 14,72 | 78,91 |
| C | 57,07 | 3,68 | 0,53 | 1,41 | 13,42 | 76,11 |
| C | 57,17 | 3,68 | 0,59 | 1,31 | 13,52 | 76,27 |
| \bar{x} | 57,82 | 3,61 | 0,54 | 1,52 | 14,11 | 77,59 |
| S_x | 0,81 | 0,08 | 0,04 | 0,18 | 0,73 | 1,62 |
| V_x [%] | 1,4018 | 2,1435 | 7,9474 | 12,0741 | 5,1982 | 2,0867 |
| D | 56,48 | 5,51 | 0,66 | 1,45 | 12,70 | 76,79 |
| D | 56,55 | 5,53 | 0,73 | 1,47 | 12,79 | 77,08 |
| D | 55,50 | 4,88 | 0,71 | 1,66 | 14,66 | 77,41 |
| D | 56,55 | 4,85 | 0,60 | 1,61 | 14,41 | 78,02 |
| \bar{x} | 56,27 | 5,19 | 0,67 | 1,55 | 13,64 | 77,33 |
| S_x | 0,51 | 0,38 | 0,06 | 0,10 | 1,04 | 0,53 |
| V_x [%] | 0,911 | 7,257 | 8,856 | 6,648 | 7,612 | 0,685 |
| E | 53,19 | 4,44 | 0,68 | 1,80 | 12,73 | 72,83 |
| E | 53,22 | 4,45 | 0,70 | 1,83 | 13,43 | 73,63 |
| E | 49,77 | 4,16 | 0,63 | 1,68 | 11,91 | 68,15 |
| E | 49,80 | 4,16 | 0,66 | 1,71 | 12,57 | 68,90 |
| \bar{x} | 51,49 | 4,30 | 0,67 | 1,76 | 12,66 | 70,88 |
| S_x | 1,97 | 0,16 | 0,03 | 0,07 | 0,63 | 2,75 |
| V_x [%] | 3,833 | 3,834 | 4,567 | 3,963 | 4,941 | 3,885 |
| F | 54,30 | 5,01 | 3,88 | 1,28 | 9,72 | 74,20 |
| F | 54,26 | 5,02 | 3,88 | 1,31 | 9,79 | 74,25 |
| F | 53,84 | 4,86 | 3,90 | 1,40 | 9,71 | 73,71 |
| F | 53,34 | 4,80 | 3,88 | 1,42 | 9,62 | 73,05 |

| | | | | | | |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| \bar{x} | 53,94 | 4,92 | 3,88 | 1,35 | 9,71 | 73,80 |
| S_x | 0,45 | 0,11 | 0,01 | 0,07 | 0,07 | 0,56 |
| V_x [%] | 0,835 | 2,240 | 0,227 | 5,041 | 0,722 | 0,753 |

* \bar{x} - aritmetický průměr, S_x – směrodatná odchylka, V_x – variační koeficient

Tab. 11.6: Hodnoty neutrálních monosacharidů ve frakcích hemicelulóz izolovaných z holocelulózy s popisnou statistikou pro jednotlivé skupiny

| Hemicelulózy rozpustné v 5% KOH - složení sacharidů | | | | | |
|--|-------|-------|--------|--------|-------|
| vzorek | GLC | XYL | GAL | ARA | MAN |
| A | 13,36 | 38,34 | 5,99 | 10,56 | 32,25 |
| A | 13,43 | 38,30 | 7,03 | 8,89 | 31,86 |
| \bar{x} | 13,39 | 38,32 | 6,51 | 9,73 | 32,05 |
| S_x | 0,05 | 0,03 | 0,74 | 1,19 | 0,28 |
| V_x [%] | 0,376 | 0,074 | 11,324 | 12,196 | 0,873 |
| B | 9,41 | 49,58 | 7,67 | 12,47 | 22,86 |
| B | 8,89 | 46,33 | 6,62 | 15,19 | 20,97 |
| \bar{x} | 9,15 | 47,96 | 7,15 | 13,83 | 21,92 |
| S_x | 0,37 | 2,30 | 0,75 | 1,92 | 1,34 |
| V_x [%] | 4,052 | 4,792 | 10,441 | 13,913 | 6,103 |
| C | 10,73 | 40,68 | 4,68 | 14,39 | 29,53 |
| C | 10,82 | 41,18 | 4,65 | 13,56 | 29,78 |
| \bar{x} | 10,77 | 40,93 | 4,66 | 13,98 | 29,66 |
| S_x | 0,06 | 0,35 | 0,02 | 0,58 | 0,17 |
| V_x [%] | 0,568 | 0,863 | 0,371 | 4,164 | 0,575 |
| D | 6,19 | 54,84 | 4,12 | 18,67 | 16,18 |
| D | 6,20 | 54,89 | 4,23 | 18,42 | 16,25 |
| \bar{x} | 6,20 | 54,87 | 4,18 | 18,54 | 16,22 |
| S_x | 0,01 | 0,04 | 0,08 | 0,18 | 0,05 |
| V_x [%] | 0,191 | 0,065 | 1,876 | 0,974 | 0,336 |
| E | 8,49 | 49,65 | 4,96 | 16,25 | 20,65 |
| E | 7,77 | 51,05 | 4,36 | 15,95 | 20,87 |
| \bar{x} | 8,13 | 50,35 | 4,66 | 16,10 | 20,76 |
| S_x | 0,51 | 0,99 | 0,42 | 0,21 | 0,15 |
| V_x [%] | 6,265 | 1,963 | 9,097 | 1,290 | 0,736 |
| F | 10,26 | 57,47 | 4,24 | 17,22 | 10,80 |
| F | 10,35 | 57,52 | 4,31 | 16,76 | 11,06 |
| \bar{x} | 10,30 | 57,49 | 4,28 | 16,99 | 10,93 |
| S_x | 0,06 | 0,03 | 0,05 | 0,32 | 0,18 |
| V_x [%] | 0,570 | 0,057 | 1,157 | 1,896 | 1,661 |
| Hemicelulózy rozpustné v 24% KOH - složení sacharidů | | | | | |

| vzorek | GLC | XYL | GAL | ARA | MAN |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| A | 17,57 | 20,49 | 3,41 | 23,49 | 35,04 |
| A | 17,24 | 19,84 | 3,33 | 23,79 | 35,81 |
| \bar{x} | 17,41 | 20,17 | 3,37 | 23,64 | 35,42 |
| S_x | 0,23 | 0,46 | 0,06 | 0,21 | 0,54 |
| V_x [%] | 1,333 | 2,282 | 1,789 | 0,894 | 1,528 |
| B | 10,59 | 26,21 | 2,70 | 20,85 | 39,65 |
| B | 10,20 | 24,72 | 2,37 | 18,43 | 44,28 |
| \bar{x} | 10,40 | 25,47 | 2,54 | 19,64 | 41,96 |
| S_x | 0,27 | 1,06 | 0,24 | 1,71 | 3,28 |
| V_x [%] | 2,639 | 4,146 | 9,307 | 8,709 | 7,808 |
| C | 11,09 | 24,63 | 1,98 | 18,43 | 44,13 |
| C | 10,69 | 24,66 | 2,04 | 19,36 | 43,01 |
| \bar{x} | 10,89 | 24,64 | 2,01 | 18,89 | 43,57 |
| S_x | 0,28 | 0,03 | 0,04 | 0,66 | 0,80 |
| V_x [%] | 2,581 | 0,104 | 2,000 | 3,495 | 1,830 |
| D | 9,79 | 25,72 | 2,25 | 16,93 | 45,31 |
| D | 10,00 | 25,60 | 2,17 | 17,18 | 45,06 |
| \bar{x} | 9,89 | 25,66 | 2,21 | 17,05 | 45,18 |
| S_x | 0,15 | 0,09 | 0,06 | 0,17 | 0,18 |
| V_x [%] | 1,506 | 0,341 | 2,598 | 1,017 | 0,393 |
| E | 9,17 | 25,37 | 2,55 | 16,15 | 45,86 |
| E | 10,18 | 28,36 | 2,35 | 14,08 | 45,93 |
| \bar{x} | 9,67 | 26,86 | 2,45 | 15,12 | 45,89 |
| S_x | 0,71 | 2,12 | 0,14 | 1,46 | 0,05 |
| V_x [%] | 7,327 | 7,886 | 5,765 | 9,664 | 0,104 |
| F | 9,12 | 21,95 | 5,34 | 13,18 | 48,91 |
| F | 10,43 | 23,09 | 4,94 | 11,62 | 51,42 |
| \bar{x} | 9,77 | 22,52 | 5,14 | 12,40 | 50,17 |
| S_x | 0,92 | 0,81 | 0,29 | 1,10 | 1,78 |
| V_x [%] | 9,451 | 3,593 | 5,560 | 8,891 | 3,541 |

* \bar{x} - aritmetický průměr, S_x – směrodatná odchylka, V_x – variační koeficient

Tab. 11.7: Hodnoty molekulové hmotnosti a polydisperzity vzorků hemicelulóz pro jednotlivé skupiny jedlového dřeva

| Hemicelulózy rozpustné v 5% KOH - GPC | | | | |
|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| vzorek | Mn | Mw | Mz | PD |
| A1 | 2031 | 24845 | 78097 | 12,23 |
| A2 | 1809 | 24325 | 77842 | 13,45 |
| A3 | 2043 | 25836 | 86819 | 12,64 |
| A4 | 1811 | 24480 | 79085 | 13,52 |
| \bar{x} | 1924 | 24872 | 80461 | 12,96 |
| S _x | 131 | 679 | 4273 | 0,49 |
| V _x [%] | 6,818 | 2,730 | 5,310 | 3,774 |
| B1 | 2069 | 26279 | 79895 | 12,70 |
| B2 | 2028 | 25821 | 77503 | 12,73 |
| B3 | 2088 | 27683 | 89899 | 13,26 |
| B4 | 2038 | 26596 | 83699 | 13,05 |
| \bar{x} | 2056 | 26595 | 82749 | 12,94 |
| S _x | 28 | 792 | 5407 | 0,27 |
| V _x [%] | 1,347 | 2,979 | 6,534 | 2,075 |
| C1 | 2301 | 31691 | 93785 | 13,77 |
| C2 | 2210 | 30698 | 88464 | 13,89 |
| C3 | 2305 | 32085 | 97059 | 13,92 |
| C4 | 2214 | 31059 | 91403 | 14,03 |
| \bar{x} | 2258 | 31383 | 92678 | 13,90 |
| S _x | 53 | 622 | 3642 | 0,11 |
| V _x [%] | 2,330 | 1,983 | 3,930 | 0,769 |
| D1 | 2672 | 33701 | 89894 | 12,61 |
| D2 | 2813 | 34395 | 89209 | 12,23 |
| D3 | 2679 | 34348 | 94159 | 12,82 |
| D4 | 2816 | 34697 | 91143 | 12,32 |
| \bar{x} | 2745 | 34285 | 91101 | 12,50 |
| S _x | 80 | 419 | 2190 | 0,27 |
| V _x [%] | 2,926 | 1,222 | 2,404 | 2,166 |
| E1 | 2984 | 35381 | 91482 | 11,86 |

| | | | | |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|
| E2 | 2878 | 34217 | 88650 | 11,89 |
| E3 | 2986 | 35554 | 92557 | 11,91 |
| E4 | 2883 | 34721 | 91966 | 12,05 |
| \bar{x} | 2933 | 34968 | 91164 | 11,93 |
| S_x | 60 | 616 | 1733 | 0,08 |
| V_x [%] | 2,059 | 1,762 | 1,900 | 0,706 |
| F1 | 2644 | 35727 | 90463 | 13,51 |
| F2 | 2838 | 34627 | 87141 | 12,20 |
| F3 | 2647 | 35964 | 92020 | 13,59 |
| F4 | 2844 | 35185 | 90499 | 12,37 |
| \bar{x} | 2743 | 35376 | 90031 | 12,92 |
| S_x | 113 | 596 | 2059 | 0,73 |
| V_x [%] | 4,116 | 1,685 | 2,287 | 5,685 |
| Hemicelulózy rozpustné v 24% KOH - GPC | | | | |
| vzorek | Mn | Mw | Mz | PD |
| A1 | 1862 | 17015 | 76028 | 9,14 |
| A2 | 1908 | 17429 | 79834 | 9,14 |
| A3 | 1847 | 16597 | 74603 | 8,99 |
| A4 | 1884 | 16646 | 76310 | 8,84 |
| \bar{x} | 1875 | 16922 | 76694 | 9,03 |
| S_x | 27 | 386 | 2223 | 0 |
| V_x [%] | 1,419 | 2,282 | 2,898 | 1,591 |
| B1 | 2499 | 29330 | 89475 | 11,74 |
| B2 | 2459 | 28548 | 87988 | 11,61 |
| B3 | 2464 | 28511 | 86613 | 11,57 |
| B4 | 2451 | 28317 | 86949 | 11,55 |
| \bar{x} | 2468 | 28677 | 87756 | 11,62 |
| S_x | 21 | 447 | 1287 | 0 |
| V_x [%] | 0,858 | 1,560 | 1,466 | 0,735 |
| C1 | 2519 | 29952 | 82411 | 11,89 |
| C2 | 2428 | 29260 | 87827 | 12,05 |
| C3 | 2509 | 29673 | 81183 | 11,83 |
| C4 | 2420 | 28946 | 85610 | 11,96 |

| | | | | |
|------------|-------|-------|-------|-------|
| \bar{x} | 2469 | 29458 | 84258 | 11,93 |
| S_x | 52 | 444 | 3024 | 0 |
| $V_x [\%]$ | 2,115 | 1,507 | 3,589 | 0,793 |
| D1 | 3049 | 34802 | 93178 | 12,61 |
| D2 | 3034 | 35004 | 93123 | 12,23 |
| D3 | 3024 | 34854 | 93523 | 12,82 |
| D4 | 3018 | 33551 | 88191 | 12,32 |
| \bar{x} | 3031 | 34553 | 92004 | 12,50 |
| S_x | 14 | 673 | 2548 | |
| $V_x [\%]$ | 0,447 | 1,949 | 2,769 | 0,000 |
| E1 | 3059 | 35052 | 93978 | 11,46 |
| E2 | 3074 | 35124 | 93273 | 11,43 |
| E3 | 3054 | 34889 | 93080 | 11,42 |
| E4 | 3008 | 33731 | 88092 | 11,21 |
| \bar{x} | 3049 | 34699 | 92106 | 11,38 |
| S_x | 28 | 653 | 2704 | 0 |
| $V_x [\%]$ | 0,934 | 1,881 | 2,935 | 1,007 |
| F1 | 2273 | 29597 | 99882 | 13,02 |
| F2 | 2268 | 29409 | 98914 | 12,97 |
| F3 | 2235 | 28344 | 94311 | 12,68 |
| F4 | 2247 | 28731 | 95870 | 12,78 |
| \bar{x} | 2256 | 29020 | 97244 | 12,86 |
| S_x | 18 | 584 | 2597 | 0 |
| $V_x [\%]$ | 0,791 | 2,014 | 2,671 | 1,241 |

* \bar{X} - aritmetický průměr, S_x – směrodatná odchylka, V_x – variační koeficient

Tab.11.8: Hodnoty molekulové hmotnosti a polydisperzity vzorků dioxanových ligninů jedlového dřeva se základní popisnou statistikou

| Molekulové hmotnosti - lignin | | | | |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| vzorek | Mn | Mw | Mz | PD |
| A1 | 1872 | 12721 | 46507 | 6,80 |
| A2 | 1855 | 12964 | 48247 | 6,99 |
| \bar{x} | 1864 | 12843 | 47377 | 6,89 |
| S_x | 12 | 172 | 1230 | 0,14 |
| V_x [%] | 0,645 | 1,338 | 2,597 | 1,983 |
| B1 | 1912 | 14624 | 55742 | 7,65 |
| B2 | 1929 | 14519 | 54138 | 7,53 |
| \bar{x} | 1921 | 14572 | 54940 | 7,59 |
| S_x | 12 | 74 | 1134 | 0,09 |
| V_x [%] | 0,626 | 0,510 | 2,064 | 1,135 |
| C1 | 2108 | 14117 | 49198 | 6,70 |
| C2 | 2026 | 13939 | 47596 | 6,88 |
| \bar{x} | 2067 | 14028 | 48397 | 6,79 |
| S_x | 58 | 126 | 1133 | 0,13 |
| V_x [%] | 2,805 | 0,897 | 2,341 | 1,908 |
| D1 | 1883 | 11908 | 46992 | 6,32 |
| D2 | 1869 | 11769 | 45969 | 6,31 |
| \bar{x} | 1876 | 11839 | 46481 | 6,32 |
| S_x | 10 | 98 | 723 | 0,01 |
| V_x [%] | 0,528 | 0,830 | 1,556 | 0,112 |
| E1 | 1942 | 11953 | 48206 | 6,16 |
| E2 | 1976 | 12196 | 50180 | 6,17 |
| \bar{x} | 1959 | 12075 | 49193 | 6,17 |
| S_x | 24 | 172 | 1396 | 0,01 |
| V_x [%] | 1,227 | 1,423 | 2,837 | 0,115 |
| F1 | 1629 | 7475 | 27651 | 4,58 |
| F2 | 1598 | 7274 | 25920 | 4,56 |
| \bar{x} | 1614 | 7375 | 26786 | 4,57 |
| S_x | 22 | 142 | 1224 | 0,01 |
| V_x [%] | 1,359 | 1,927 | 4,570 | 0,309 |

* \bar{x} - aritmetický průměr, S_x – směrodatná odchylka, V_x – variační koeficient

Tab.11.9: Poměry absorbací při vlnóčtech 1422/895 a 1102/1052 pro určení stupně krystalinity celulózy metodou FT-IR

| Vlnóčet (cm ⁻¹) | | | | | | |
|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|----------|-----------|
| Vzorek | 895 | 1052 | 1102 | 1422 | 1422/895 | 1102/1052 |
| A1 | 0,0140 | 0,1270 | 0,0720 | 0,0220 | 1,57 | 0,57 |
| A2 | 0,0170 | 0,1550 | 0,0880 | 0,0280 | 1,65 | 0,57 |
| A3 | 0,0068 | 0,0546 | 0,0285 | 0,0091 | 1,34 | 0,52 |
| A4 | 0,0037 | 0,0281 | 0,0150 | 0,0047 | 1,27 | 0,53 |
| A5 | 0,0100 | 0,0694 | 0,0373 | 0,0128 | 1,28 | 0,54 |
| A6 | 0,0110 | 0,0790 | 0,0390 | 0,0120 | 1,09 | 0,49 |
| B1 | 0,0080 | 0,0547 | 0,0281 | 0,0083 | 1,04 | 0,51 |
| B2 | 0,0060 | 0,0365 | 0,0199 | 0,0063 | 1,05 | 0,55 |
| B3 | 0,0067 | 0,0523 | 0,0277 | 0,0075 | 1,12 | 0,53 |
| B4 | 0,0140 | 0,0890 | 0,0490 | 0,0150 | 1,07 | 0,55 |
| B5 | 0,0110 | 0,0850 | 0,0500 | 0,0150 | 1,36 | 0,59 |
| B6 | 0,0038 | 0,0268 | 0,0144 | 0,0042 | 1,11 | 0,54 |
| C1 | 0,0045 | 0,0398 | 0,0307 | 0,0064 | 1,42 | 0,77 |
| C2 | 0,0059 | 0,0500 | 0,0260 | 0,0071 | 1,20 | 0,52 |
| C3 | 0,0076 | 0,0632 | 0,0349 | 0,0102 | 1,34 | 0,55 |
| C4 | 0,0063 | 0,0460 | 0,0246 | 0,0074 | 1,17 | 0,53 |
| C5 | 0,0069 | 0,0506 | 0,0287 | 0,0088 | 1,28 | 0,57 |
| C6 | 0,0030 | 0,0236 | 0,0124 | 0,0038 | 1,27 | 0,53 |
| D1 | 0,0063 | 0,0507 | 0,0258 | 0,0082 | 1,30 | 0,51 |
| D2 | 0,0087 | 0,0694 | 0,0384 | 0,0098 | 1,13 | 0,55 |
| D3 | 0,0130 | 0,0900 | 0,0480 | 0,0140 | 1,08 | 0,53 |
| D4 | 0,0073 | 0,0590 | 0,0318 | 0,0082 | 1,12 | 0,54 |
| D5 | 0,0050 | 0,0319 | 0,0179 | 0,0058 | 1,16 | 0,56 |
| D6 | 0,0086 | 0,0527 | 0,0283 | 0,0093 | 1,08 | 0,54 |
| E1 | 0,0042 | 0,0312 | 0,0164 | 0,0064 | 1,52 | 0,53 |
| E2 | 0,0047 | 0,0354 | 0,0188 | 0,0054 | 1,15 | 0,53 |
| E3 | 0,0090 | 0,0880 | 0,0450 | 0,0160 | 1,78 | 0,51 |
| E4 | 0,0200 | 0,1160 | 0,0610 | 0,0200 | 1,00 | 0,53 |
| E5 | 0,0023 | 0,0172 | 0,0091 | 0,0032 | 1,39 | 0,53 |
| E6 | 0,0024 | 0,0109 | 0,0053 | 0,0024 | 1,00 | 0,49 |
| F1 | 0,0090 | 0,0740 | 0,0380 | 0,0110 | 1,22 | 0,51 |

| | | | | | | |
|-----------|--------|--------|--------|--------|------|------|
| F2 | 0,0069 | 0,0581 | 0,0317 | 0,0078 | 1,13 | 0,55 |
| F3 | 0,0040 | 0,0344 | 0,0181 | 0,0046 | 1,15 | 0,53 |
| F4 | 0,0046 | 0,0367 | 0,0196 | 0,0057 | 1,24 | 0,53 |
| F5 | 0,0021 | 0,0110 | 0,0065 | 0,0052 | 2,48 | 0,59 |
| F6 | 0,0034 | 0,0155 | 0,0086 | 0,0057 | 1,68 | 0,55 |

11.3 Mechanické zatížení zkušebních těles

V tab 11.10–11.13 jsou uvedeny hodnoty pevnosti jedlového dřeva v tlaku ve směru vláken, v tahu rovnoběžně s vlákny, ve smyku a ve statickém ohybu. Hodnoty jsou uvedeny s popisnou statistikou pro jednotlivé pevnosti.

Tab. 11.10: Hodnoty pevnosti dřeva v tlaku ve směru vláken pro jednotlivé skupiny

| Skupina | n | Rozměr [mm] | | | Hmotnost mw [g] | Síla F max [N] | Pevnost σ [Mpa] | Hustota ρ [kg.m ⁻³] |
|---------|----|-------------|-------|-------|-----------------------|----------------------|------------------------------|--|
| | | a | b | l | | | | |
| A | 1 | 19,96 | 20,26 | 30,38 | 5,17 | 19000 | 46,98 | 585,895 |
| A | 2 | 19,86 | 20,4 | 30,21 | 5,08 | 18550 | 45,79 | 575,632 |
| A | 3 | 20,49 | 19,98 | 30,45 | 5,28 | 17100 | 41,77 | 507,734 |
| A | 4 | 19,85 | 20,17 | 30,32 | 5,47 | 20150 | 50,33 | 620,797 |
| A | 5 | 19,83 | 20,39 | 30,37 | 5,11 | 17250 | 42,66 | 538,677 |
| A | 6 | 19,72 | 20,08 | 30,19 | 5,03 | 18400 | 46,47 | 565,636 |
| A | 7 | 19,87 | 20,36 | 30,6 | 5,52 | 20050 | 49,56 | 628,659 |
| A | 8 | 19,91 | 20,4 | 30,32 | 5,22 | 18750 | 46,16 | 582,491 |
| A | 9 | 19,84 | 20,13 | 30,37 | 5,15 | 18800 | 47,07 | 579,301 |
| A | 10 | 19,94 | 20,38 | 30,4 | 5,23 | 18300 | 45,03 | 568,595 |
| A | 11 | 19,9 | 20,36 | 30,42 | 5,2 | 18400 | 45,41 | 572,666 |
| A | 12 | 19,91 | 20,45 | 30,34 | 5,24 | 18550 | 45,56 | 578,071 |
| A | 13 | 19,91 | 20,38 | 30,31 | 5,36 | 19050 | 46,95 | 591,035 |
| A | 14 | 19,91 | 20,16 | 30,27 | 5,19 | 19200 | 47,83 | 588,481 |
| A | 15 | 19,9 | 20,22 | 30,34 | 5,24 | 17400 | 43,24 | 536,405 |
| A | 16 | 19,7 | 20,13 | 30,29 | 5,06 | 17600 | 44,38 | 544,740 |
| A | 17 | 19,85 | 20,42 | 30,33 | 5,13 | 18800 | 46,38 | 586,577 |
| A | 18 | 19,87 | 20,19 | 30,4 | 5,18 | 18400 | 45,87 | 568,368 |
| A | 19 | 19,88 | 20,34 | 30,24 | 5,17 | 18750 | 46,37 | 580,119 |
| A | 20 | 19,92 | 20,18 | 30,46 | 5,16 | 18500 | 46,02 | 570,865 |
| A | 21 | 19,84 | 20,35 | 30,84 | 5,29 | 19100 | 47,31 | 604,185 |
| A | 22 | 19,95 | 20,48 | 30,64 | 5,3 | 18450 | 45,16 | 580,326 |
| A | 23 | 19,71 | 20,15 | 30,29 | 5,47 | 17850 | 44,94 | 552,746 |

Přílohy

| | | | | | | | | |
|---|----|-------|-------|-------|------|-------|-------|----------|
| A | 24 | 19,73 | 20,12 | 30,26 | 5,18 | 17200 | 43,33 | 530,760 |
| A | 25 | 19,84 | 20,13 | 30,37 | 5,28 | 18450 | 46,20 | 568,516 |
| A | 26 | 19,95 | 20,47 | 30,54 | 5,25 | 18900 | 46,28 | 592,25 |
| A | 27 | 19,7 | 20,13 | 30,22 | 5,15 | 15800 | 39,84 | 487,891 |
| A | 28 | 19,76 | 20,08 | 30,2 | 5,39 | 18800 | 47,38 | 576,955 |
| A | 29 | 19,95 | 20,47 | 30,13 | 5,14 | 17300 | 42,36 | 534,834 |
| A | 30 | 19,88 | 20,12 | 30,44 | 7,9 | 13400 | 33,50 | 412,823 |
| B | 1 | 20,13 | 19,31 | 29,88 | 5,15 | 18500 | 47,59 | 530,2624 |
| B | 2 | 20,31 | 19,39 | 29,82 | 5,14 | 17850 | 45,33 | 508,1755 |
| B | 3 | 20,07 | 19,28 | 30,41 | 4,98 | 16400 | 42,38 | 479,0931 |
| B | 4 | 20 | 19,45 | 29,87 | 5,26 | 17900 | 46,02 | 519,9695 |
| B | 5 | 20 | 19,43 | 29,9 | 5,44 | 19900 | 51,21 | 578,0522 |
| B | 6 | 19,52 | 19,63 | 29,88 | 5,32 | 19700 | 51,41 | 591,9531 |
| B | 7 | 19,41 | 19,81 | 29,83 | 5,15 | 18550 | 48,24 | 564,7498 |
| B | 8 | 19,33 | 20,08 | 30 | 5,45 | 19000 | 48,95 | 592,1159 |
| B | 9 | 20,03 | 19,48 | 29,96 | 5,44 | 20100 | 51,51 | 585,6604 |
| B | 10 | 20,07 | 19,27 | 29,95 | 5,19 | 17950 | 46,41 | 516,1734 |
| B | 11 | 19,99 | 19,45 | 29,75 | 5,62 | 20350 | 52,34 | 589,0582 |
| B | 12 | 19,78 | 19,4 | 29,9 | 5,17 | 17850 | 46,52 | 523,4616 |
| B | 13 | 19,72 | 19,48 | 29,81 | 5,32 | 19650 | 51,15 | 578,6375 |
| B | 14 | 20,04 | 19,33 | 29,91 | 5,37 | 18050 | 46,60 | 520,7482 |
| B | 15 | 20,32 | 19,37 | 29,86 | 5,29 | 18300 | 46,49 | 520,8909 |
| B | 16 | 20,32 | 19,28 | 29,88 | 5,15 | 18600 | 47,48 | 527,3232 |
| B | 17 | 20,14 | 19,31 | 29,83 | 5,36 | 19500 | 50,14 | 557,7129 |
| B | 18 | 19,98 | 19,3 | 30,31 | 5,25 | 18600 | 48,23 | 544,5788 |
| B | 19 | 20,05 | 19,54 | 29,98 | 5,77 | 19500 | 49,77 | 569,7396 |
| B | 20 | 20,22 | 19,24 | 30,23 | 4,75 | 13850 | 35,60 | 398,3931 |
| B | 21 | 19,98 | 19,27 | 29,91 | 5,35 | 19700 | 51,17 | 568,2885 |
| B | 22 | 20,04 | 19,43 | 29,82 | 5,46 | 19850 | 50,98 | 573,9093 |
| B | 23 | 20,13 | 19,35 | 30,2 | 4,97 | 16000 | 41,08 | 464,4769 |
| B | 24 | 20,12 | 19,27 | 29,92 | 5,3 | 19100 | 49,26 | 547,3293 |
| B | 25 | 20,17 | 19,19 | 29,92 | 5,18 | 18250 | 47,15 | 519,5095 |
| B | 26 | 20,13 | 19,29 | 30,24 | 4,82 | 11550 | | 334,6973 |
| B | 27 | 20,07 | 19,23 | 29,91 | 5,41 | 19250 | 49,88 | 551,6696 |
| B | 28 | 20,01 | 19,19 | 29,94 | 5,38 | 19300 | 50,26 | 554,1623 |
| B | 29 | 19,84 | 19,23 | 30,3 | 5,7 | 16250 | 42,59 | 477,2365 |
| B | 30 | 20,47 | 19,51 | 29,71 | 6,33 | 10750 | | 304,4041 |
| B | 1 | 20,13 | 19,31 | 29,88 | 5,15 | 18500 | 47,59 | 530,2624 |
| B | 2 | 20,31 | 19,39 | 29,82 | 5,14 | 17850 | 45,33 | 508,1755 |
| B | 3 | 20,07 | 19,28 | 30,41 | 4,98 | 16400 | 42,38 | 479,0931 |
| B | 4 | 20 | 19,45 | 29,87 | 5,26 | 17900 | 46,02 | 519,9695 |
| B | 5 | 20 | 19,43 | 29,9 | 5,44 | 19900 | 51,21 | 578,0522 |
| B | 6 | 19,52 | 19,63 | 29,88 | 5,32 | 19700 | 51,41 | 591,9531 |
| B | 7 | 19,41 | 19,81 | 29,83 | 5,15 | 18550 | 48,24 | 564,7498 |
| B | 8 | 19,33 | 20,08 | 30 | 5,45 | 19000 | 48,95 | 592,1159 |
| B | 9 | 20,03 | 19,48 | 29,96 | 5,44 | 20100 | 51,51 | 585,6604 |
| B | 10 | 20,07 | 19,27 | 29,95 | 5,19 | 17950 | 46,41 | 516,1734 |
| B | 11 | 19,99 | 19,45 | 29,75 | 5,62 | 20350 | 52,34 | 589,0582 |
| B | 12 | 19,78 | 19,4 | 29,9 | 5,17 | 17850 | 46,52 | 523,4616 |
| B | 13 | 19,72 | 19,48 | 29,81 | 5,32 | 19650 | 51,15 | 578,6375 |
| B | 14 | 20,04 | 19,33 | 29,91 | 5,37 | 18050 | 46,60 | 520,7482 |

Přílohy

| | | | | | | | | |
|---|----|-------|-------|-------|------|-------|-------|----------|
| B | 15 | 20,32 | 19,37 | 29,86 | 5,29 | 18300 | 46,49 | 520,8909 |
| B | 16 | 20,32 | 19,28 | 29,88 | 5,15 | 18600 | 47,48 | 527,3232 |
| C | 1 | 19,78 | 19,65 | 30,17 | 4,86 | 11650 | 29,97 | 349,1705 |
| C | 2 | 19,52 | 19,72 | 30,16 | 5,09 | 9550 | 24,81 | 290,9791 |
| C | 3 | 19,63 | 19,73 | 30,2 | 4,72 | 11850 | 30,60 | 359,6931 |
| C | 4 | 19,28 | 19,81 | 30,24 | 4,89 | 8450 | 22,12 | 262,5524 |
| C | 5 | 19,37 | 19,63 | 30,37 | 4,56 | 10000 | 26,30 | 307,7765 |
| C | 6 | 19,6 | 19,62 | 30,18 | 4,73 | 11850 | 30,82 | 357,9979 |
| C | 7 | 19,21 | 19,69 | 29,95 | 4,72 | 11600 | 30,67 | 356,101 |
| C | 8 | 19,67 | 19,7 | 30,24 | 5,27 | 12250 | 31,61 | 371,005 |
| C | 9 | 19,69 | 19,63 | 30,22 | 5,31 | 12950 | 33,50 | 390,1565 |
| C | 10 | 19,65 | 19,24 | 30,2 | 4,78 | 11200 | 29,62 | 331,1826 |
| C | 11 | 19,68 | 19,68 | 29,98 | 4,64 | 9300 | 24,01 | 278,814 |
| C | 12 | 19,68 | 19,58 | 30,17 | 4,74 | 9700 | 25,17 | 291,162 |
| C | 13 | 19,72 | 19,6 | 30,21 | 4,8 | 9800 | 25,35 | 294,2564 |
| C | 14 | 19,62 | 19,58 | 30,17 | 4,68 | 9950 | 25,90 | 299,5795 |
| C | 15 | 19,38 | 19,62 | 30,31 | 4,42 | 9950 | 26,17 | 305,3193 |
| C | 16 | 19,3 | 19,64 | 30,28 | 4,97 | 13100 | 34,56 | 403,6559 |
| C | 17 | 19,54 | 19,59 | 30,25 | 4,75 | 11850 | 30,96 | 359,3798 |
| C | 18 | 19,42 | 19,63 | 30,11 | 4,45 | 8150 | 21,38 | 248,0501 |
| C | 19 | 19,32 | 19,61 | 30,26 | 4,28 | 9850 | 26,00 | 302,535 |
| C | 20 | 19,44 | 19,66 | 30,21 | 4,78 | 10050 | 26,30 | 307,0464 |
| C | 21 | 19,34 | 19,61 | 30,2 | 4,73 | 11050 | 29,14 | 338,3688 |
| C | 22 | 19,18 | 19,69 | 30,3 | 4,28 | 8450 | 22,37 | 262,843 |
| C | 23 | 19,4 | 19,76 | 29,96 | 4,36 | 7500 | 19,56 | 228,8697 |
| C | 24 | 19,3 | 19,68 | 30,29 | 4,45 | 9650 | 25,41 | 298,0536 |
| C | 25 | 19,46 | 19,62 | 30,15 | 4,48 | 7900 | 20,69 | 240,1434 |
| C | 26 | 19,3 | 19,65 | 30,14 | 4,99 | 7750 | 20,44 | 237,821 |
| C | 27 | 19,2 | 19,62 | 30,24 | 4,28 | 6750 | 17,92 | 208,5851 |
| C | 28 | 19,28 | 19,77 | 30,19 | 4,94 | 10350 | 27,15 | 320,4078 |
| C | 29 | 19,21 | 19,7 | 30,26 | 4,51 | 7600 | 20,08 | 235,8421 |
| C | 30 | 18,84 | 19,75 | 30,25 | 6,73 | 12200 | 32,79 | 386,8757 |
| D | 1 | 20,14 | 19,35 | 30,23 | 6,03 | 23750 | 60,94 | 689,8001 |
| D | 2 | 20,11 | 19,87 | 30,2 | 6,16 | 21900 | 54,81 | 653,4869 |
| D | 3 | 20,07 | 19,66 | 30,12 | 5,91 | 23450 | 59,43 | 691,8851 |
| D | 4 | 20,21 | 19,48 | 30,21 | 6,16 | 24350 | 61,85 | 709,0426 |
| D | 5 | 20,12 | 19,33 | 30,17 | 6,02 | 23450 | 60,30 | 679,7075 |
| D | 6 | 19,93 | 19,47 | 30,19 | 5,71 | 22300 | 57,47 | 657,6982 |
| D | 7 | 19,94 | 19,56 | 30,17 | 6,19 | 22750 | 58,33 | 673,2873 |
| D | 8 | 20,09 | 19,67 | 30,28 | 5,95 | 23550 | 59,59 | 698,1861 |
| D | 9 | 19,58 | 19,96 | 30,18 | 5,7 | 22300 | 57,06 | 686,0756 |
| D | 10 | 19,97 | 19,6 | 30,21 | 5,8 | 22950 | 58,63 | 680,4738 |
| D | 11 | 19,92 | 19,65 | 30,08 | 5,79 | 22400 | 57,23 | 664,6593 |
| D | 12 | 20,28 | 19,28 | 30,21 | 6,33 | 22450 | 57,42 | 644,772 |
| D | 13 | 20,3 | 19,11 | 30,16 | 6,2 | 24050 | 62,00 | 682,8276 |
| D | 14 | 20,17 | 19,54 | 30,19 | 6,05 | 18100 | 45,92 | 529,3712 |
| D | 15 | 20,16 | 19,99 | 30,24 | 6,06 | 23300 | 57,82 | 698,6505 |
| D | 16 | 20,19 | 19,64 | 30,1 | 6,4 | 16350 | | 478,7286 |
| D | 17 | 20,06 | 19,43 | 30,26 | 6,94 | 19350 | 49,65 | 567,1419 |
| D | 18 | 20,12 | 19,45 | 30,3 | 6,29 | 21550 | 55,07 | 631,2211 |
| D | 19 | 20,11 | 19,43 | 30,24 | 6,71 | 24250 | 62,06 | 708,5235 |

Přílohy

| | | | | | | | | |
|---|----|-------|-------|-------|------|-------|-------|----------|
| D | 20 | 19,93 | 19,47 | 30,1 | 6,46 | 23950 | 61,72 | 704,2562 |
| D | 21 | 20,2 | 19,11 | 30,2 | 6,16 | 24500 | 63,47 | 699,9747 |
| D | 22 | 19,58 | 19,13 | 29,92 | 4,43 | 15400 | | 450,1783 |
| D | 23 | 19,96 | 19,4 | 30,19 | 7 | 19050 | 49,20 | 558,9839 |
| D | 24 | 20,03 | 19,51 | 30 | 6,15 | 22100 | 56,55 | 645,7878 |
| D | 25 | 19,97 | 19,54 | 30,11 | 6,15 | 23100 | 59,20 | 680,5644 |
| D | 26 | 20,09 | 19,35 | 30,2 | 6,22 | 22950 | 59,04 | 667,5606 |
| D | 27 | 20,2 | 19,15 | 30,26 | 6,57 | 24150 | 62,43 | 692,793 |
| D | 28 | 20,04 | 19,56 | 30,19 | 6,23 | 23100 | 58,93 | 680,6851 |
| E | 1 | 19,21 | 19,31 | 29,9 | 4,6 | 16400 | 44,21 | 492,9126 |
| E | 2 | 19,08 | 19,7 | 30 | 4,64 | 14400 | 38,31 | 446,0377 |
| E | 3 | 19,31 | 19,35 | 29,74 | 4,2 | 14900 | 39,88 | 444,0439 |
| E | 4 | 19,2 | 19,26 | 29,88 | 4,68 | 15750 | 42,59 | 472,0807 |
| E | 5 | 19,28 | 19,27 | 29,86 | 4,75 | 16200 | 43,60 | 483,4811 |
| E | 6 | 19,3 | 19,29 | 29,91 | 4,63 | 16650 | 44,72 | 497,7435 |
| E | 7 | 19,21 | 19,09 | 29,89 | 4,65 | 15800 | 43,08 | 469,3119 |
| E | 8 | 19,31 | 19,11 | 29,84 | 4,65 | 16300 | 44,17 | 481,3543 |
| E | 9 | 19,35 | 19,26 | 30,14 | 4,42 | 14500 | 38,91 | 434,9973 |
| E | 10 | 19,28 | 19,33 | 30,09 | 4,73 | 16300 | 43,74 | 491,739 |
| E | 11 | 19,25 | 19,34 | 29,83 | 4,47 | 15900 | 42,71 | 476,5145 |
| E | 12 | 19,13 | 19,31 | 29,96 | 4,69 | 16700 | 45,21 | 505,0398 |
| E | 13 | 19,34 | 19,3 | 30,01 | 4,58 | 17000 | 45,54 | 509,1148 |
| E | 14 | 19,13 | 19,71 | 29,78 | 4,48 | 15850 | 42,04 | 486,3239 |
| E | 15 | 19,26 | 19,73 | 29,87 | 4,47 | 16650 | 43,82 | 509,4719 |
| E | 16 | 19,32 | 19,36 | 29,72 | 4,43 | 15650 | 41,84 | 466,081 |
| E | 17 | 19,09 | 19,35 | 29,87 | 4,22 | 15150 | 41,01 | 458,6938 |
| E | 18 | 18,91 | 19,58 | 29,83 | 4,33 | 15100 | 40,78 | 466,3923 |
| E | 19 | 19,32 | 19,48 | 29,86 | 4,93 | 14300 | 38,00 | 430,5342 |
| E | 20 | 19,12 | 19,74 | 29,84 | 4,49 | 14650 | 38,82 | 451,3316 |
| E | 21 | 19,56 | 19,3 | 29,9 | 4,47 | 15550 | 41,19 | 458,7647 |
| E | 22 | 19,06 | 19,7 | 29,83 | 4,38 | 13900 | | 428,5598 |
| E | 23 | 19,01 | 19,51 | 29,73 | 4,35 | 14650 | 39,50 | 447,0002 |
| E | 24 | 19,05 | 19,65 | 2,84 | 4,43 | 14150 | | 41,4517 |
| E | 25 | 19,26 | 19,55 | 29,87 | 4,46 | 16050 | 42,63 | 486,6321 |
| E | 26 | 19,02 | 19,63 | 29,83 | 4,34 | 14500 | 38,84 | 446,407 |
| E | 27 | 19,03 | 19,72 | 29,9 | 4,36 | 15550 | 41,44 | 481,8032 |
| E | 28 | 19,32 | 19,32 | 29,9 | 4,77 | 15400 | 41,26 | 460,46 |
| E | 29 | 19,21 | 19,54 | 29,78 | 4,48 | 15000 | 39,96 | 454,3737 |
| F | 1 | 19,27 | 20,04 | 30,76 | 5,47 | 19100 | 49,46 | 610,9922 |
| F | 2 | 19,53 | 19,96 | 30,47 | 6,25 | 21450 | 55,03 | 667,9717 |
| F | 3 | 19,63 | 19,8 | 30,87 | 6,24 | 21400 | 55,06 | 666,3391 |
| F | 4 | 19,18 | 19,92 | 30,74 | 5,53 | 18550 | 48,55 | 592,2274 |
| F | 5 | 19,72 | 19,78 | 30,42 | 5,52 | 18900 | 48,45 | 576,6873 |
| F | 6 | 19,55 | 19,86 | 30,75 | 6,27 | 21550 | 55,50 | 673,1702 |
| F | 7 | 19,58 | 19,92 | 30,61 | 6,25 | 22000 | 56,41 | 685,1137 |
| F | 8 | 19,4 | 20,02 | 30,98 | 5,51 | 18400 | 47,38 | 588,2495 |
| F | 9 | 19,3 | 19,97 | 30,46 | 5,4 | 18800 | 48,78 | 592,5275 |
| F | 10 | 19,2 | 19,91 | 30,9 | 5,42 | 17500 | 45,78 | 560,7465 |
| F | 11 | 19,69 | 19,5 | 30,76 | 5,54 | 19300 | 50,27 | 587,9394 |
| F | 12 | 19,7 | 19,65 | 30,86 | 5,51 | 18350 | 47,40 | 564,8437 |
| F | 13 | 19,56 | 19,9 | 30,95 | 6,23 | 21200 | 54,46 | 667,5453 |

Přílohy

| | | | | | | | | |
|------------|----|--------|--------|---------|--------|-----------|--------|----------|
| F | 14 | 19,95 | 19,96 | 30,42 | 6,29 | 21800 | 54,75 | 663,4884 |
| F | 15 | 19,55 | 19,6 | 30,69 | 6,23 | 20650 | 53,89 | 635,3693 |
| \bar{x} | - | 19,691 | 19,683 | 46,927 | 5,345 | 17293,575 | 45,345 | 875,595 |
| S_x | - | 0,370 | 0,349 | 224,949 | 0,706 | 4202,035 | 10,300 | 4760,643 |
| $V_x [\%]$ | - | 1,878 | 1,771 | 479,355 | 13,215 | 24,298 | 23,411 | 543,704 |

* \bar{x} - aritmetický průměr, S_x – směrodatná odchylka, V_x – variační koeficient

Tab. 11.11: Hodnoty pevnosti dřeva v tahu rovnoběžně s vlákny

| Skupina | Rozměr [mm] | | | Síla F max [N] | Pevnost σ [Mpa] |
|---------|-------------|-------|------|----------------------|------------------------------|
| | n | b | h | | |
| A | 1 | 19,97 | 4,75 | 5070 | 53,45 |
| A | 2 | 20,07 | 4,78 | 5220 | 54,41 |
| A | 3 | 20,05 | 4,6 | 5240 | 56,81 |
| A | 4 | 20,02 | 4,85 | 5540 | 57,06 |
| A | 5 | 20,47 | 3,92 | 2610 | 32,53 |
| A | 6 | 20,36 | 3,83 | 4400 | 56,43 |
| A | 7 | 19,85 | 4,73 | | 0,00 |
| A | 8 | 20,06 | 4,74 | 5660 | 59,53 |
| A | 9 | 20,05 | 4,68 | 4140 | 44,12 |
| A | 10 | 20,34 | 4,15 | | 0,00 |
| A | 11 | 19,48 | 5,08 | 6800 | 68,72 |
| A | 12 | 20,25 | 3,48 | 4720 | 66,98 |
| A | 13 | 20,02 | 5,1 | 8230 | 80,61 |
| A | 14 | 19,82 | 4,86 | 6480 | 67,27 |
| A | 15 | 20,07 | 5,03 | 6080 | 60,23 |
| A | 16 | 19,82 | 4,31 | 8060 | 94,35 |
| A | 17 | 20,6 | 3,92 | 4060 | 50,28 |
| A | 18 | 20,08 | 5,07 | 5300 | 52,06 |
| A | 19 | 19,69 | 3,8 | 4690 | 62,68 |
| A | 20 | 19,96 | 4,48 | 7610 | 85,10 |
| A | 21 | 19,32 | 3,2 | 4780 | 77,32 |
| A | 22 | 19,78 | 4,92 | 4290 | 44,08 |
| A | 23 | 19,96 | 4,43 | 6530 | 73,85 |
| A | 24 | 20,59 | 3,87 | 3760 | 47,19 |
| A | 25 | 19,98 | 4,69 | 5630 | 60,08 |
| A | 26 | 20,26 | 3,92 | 3550 | 44,70 |
| A | 27 | 19,92 | 4,51 | 2880 | 32,06 |
| A | 28 | 19,67 | 4,64 | 6840 | 74,94 |
| A | 29 | 19,41 | 3,34 | 4820 | 74,35 |
| B | 1 | 20,07 | 3,75 | 2110 | 28,04 |
| B | 2 | 19,45 | 3,99 | 7660 | 98,70 |
| B | 3 | 20,25 | 3,49 | 5950 | 84,19 |
| B | 4 | 20,1 | 3,05 | 5990 | 97,71 |
| B | 5 | 20,27 | 3,17 | 5230 | 81,39 |

Přílohy

| | | | | | |
|---|----|-------|------|------|--------|
| B | 6 | 20,23 | 3,32 | 3670 | 54,64 |
| B | 7 | 19,02 | 4,47 | 7770 | 91,39 |
| B | 8 | 20,15 | 3,28 | 510 | 7,72 |
| B | 9 | 19,18 | 3,37 | 4580 | 70,86 |
| B | 10 | 19,29 | 4,24 | 4490 | 54,90 |
| B | 11 | 19,27 | 4,11 | 4660 | 58,84 |
| B | 12 | 20,11 | 3,67 | 4680 | 63,41 |
| B | 13 | 20,03 | 3,07 | 5050 | 82,12 |
| B | 14 | 19,76 | 3,35 | 1620 | 24,47 |
| B | 15 | 20,13 | 3,37 | 5020 | 74,00 |
| B | 16 | 20,03 | 3,51 | 7170 | 101,98 |
| B | 17 | 20,02 | 3,34 | 1890 | 28,27 |
| B | 18 | 20,13 | 3,58 | 1380 | 19,15 |
| B | 19 | 19,01 | 4,76 | 6320 | 69,84 |
| B | 20 | 19,67 | 3,7 | 2630 | 36,14 |
| B | 21 | 19,21 | 4,48 | 4430 | 51,48 |
| B | 22 | 20,12 | 3,56 | 6810 | 95,08 |
| B | 23 | 20,01 | 4,13 | 1650 | 19,97 |
| B | 24 | 19,78 | 4,12 | 1450 | 17,79 |
| B | 25 | 19,17 | 3,54 | 4330 | 63,81 |
| B | 26 | 19,14 | 3,54 | 1100 | 16,23 |
| B | 27 | 18,81 | 4,1 | 4930 | 63,93 |
| B | 28 | 19,9 | 3,52 | 6890 | 98,36 |
| C | 1 | 19,71 | 4,42 | 8940 | 102,62 |
| C | 2 | 19,75 | 4,59 | 5440 | 60,01 |
| C | 3 | 19,64 | 4,48 | 6900 | 78,42 |
| C | 4 | 19,53 | 4,67 | 2100 | 23,03 |
| C | 5 | 19,08 | 4,46 | 3450 | 40,54 |
| C | 6 | 18,85 | 4,31 | 7260 | 89,36 |
| C | 7 | 18,8 | 3,97 | 1040 | 13,93 |
| C | 8 | 19,46 | 4,22 | 1880 | 22,89 |
| C | 9 | 20,31 | 4,05 | 5570 | 67,72 |
| C | 10 | 19,41 | 4,19 | 3380 | 41,56 |
| C | 11 | 19,17 | 2,99 | 2950 | 51,47 |
| C | 12 | 19,52 | 4,28 | 3660 | 43,81 |
| C | 13 | 19,41 | 4,09 | 1230 | 15,49 |
| C | 14 | 18,81 | 4,65 | 1850 | 21,15 |
| C | 15 | 19,39 | 4,61 | 1270 | 14,21 |
| C | 16 | 19,82 | 4,04 | 1700 | 21,23 |
| C | 17 | 19,42 | 4,38 | 1920 | 22,57 |
| C | 18 | 19,14 | 4,25 | 700 | 8,61 |
| C | 19 | 19,04 | 4,11 | 4030 | 51,50 |
| C | 20 | 19,27 | 4,21 | 1570 | 19,35 |
| C | 21 | 19,13 | 4,87 | 1110 | 11,91 |
| C | 22 | 19,28 | 4,08 | 1390 | 17,67 |
| C | 23 | 19,42 | 4,32 | 1140 | 13,59 |
| C | 24 | 19,63 | 4,45 | 1150 | 13,16 |
| C | 25 | 19,84 | 3,34 | 710 | 10,71 |
| C | 26 | 19,32 | 4,55 | 1090 | 12,40 |
| C | 27 | 19,04 | 4,42 | 1430 | 16,99 |
| C | 28 | 19,15 | 4,14 | 3740 | 47,17 |
| C | 29 | 20,44 | 3,75 | 890 | 11,61 |

Přílohy

| | | | | | |
|---|----|-------|------|------|--------|
| D | 1 | 19,56 | 3,88 | 7650 | 100,80 |
| D | 2 | 19,52 | 3,75 | 8820 | 120,49 |
| D | 3 | 19,6 | 3,59 | 5120 | 72,76 |
| D | 4 | 19,49 | 3,67 | 6610 | 92,41 |
| D | 5 | 19,29 | 3,98 | 7040 | 91,70 |
| D | 6 | 19,53 | 3,88 | 8760 | 115,60 |
| D | 7 | 19,59 | 3,65 | 4450 | 62,23 |
| D | 8 | 19,54 | 3,68 | 7230 | 100,55 |
| D | 9 | 19,45 | 3,08 | 4990 | 83,30 |
| D | 10 | 19,58 | 3,39 | 3530 | 53,18 |
| D | 11 | 19,6 | 3,57 | 7650 | 109,33 |
| D | 12 | 19,52 | 3,87 | 2030 | 26,87 |
| D | 13 | 19,6 | 3,74 | 7100 | 96,86 |
| D | 14 | 19,63 | 3,59 | 3740 | 53,07 |
| D | 15 | 19,68 | 2,76 | 3810 | 70,14 |
| D | 16 | 19,21 | 3,64 | 2760 | 39,47 |
| D | 17 | 18,87 | 3,76 | 5800 | 81,75 |
| D | 18 | 19,49 | 3,95 | 5620 | 73,00 |
| D | 19 | 19,65 | 3,29 | 1290 | 19,95 |
| D | 20 | 19,44 | 2,61 | 6020 | 118,65 |
| D | 21 | 19,35 | 2,98 | 3730 | 64,69 |
| D | 22 | 19,48 | 3,51 | 3230 | 47,24 |
| D | 23 | 19,6 | 3,76 | 3570 | 48,44 |
| D | 24 | 19,48 | 3,41 | 5120 | 77,08 |
| D | 25 | 19,42 | 2,86 | 1780 | 32,05 |
| D | 26 | 19,67 | 4,2 | 3420 | 41,40 |
| D | 27 | 19,35 | 3,88 | 3690 | 49,15 |
| D | 28 | 19,34 | 3,84 | 3110 | 41,88 |
| D | 29 | 19,53 | 3,68 | 1400 | 19,48 |
| E | 1 | 20,28 | 3,87 | 8550 | 108,94 |
| E | 2 | 19,45 | 3,42 | 6510 | 97,87 |
| E | 3 | 19,2 | 4,88 | 4650 | 49,63 |
| E | 4 | 19,56 | 4,52 | 5700 | 64,47 |
| E | 5 | 19,43 | 3,64 | 4430 | 62,64 |
| E | 6 | 19,29 | 3,11 | 3810 | 63,51 |
| E | 7 | 19,21 | 3,21 | 2440 | 39,57 |
| E | 8 | 19,74 | 4,62 | 8430 | 92,44 |
| E | 9 | 19,13 | 2,99 | 5070 | 88,64 |
| E | 10 | 19,39 | 3,29 | 4140 | 64,90 |
| E | 11 | 20,08 | 4,18 | 7240 | 86,26 |
| E | 12 | 19,23 | 3,51 | 3820 | 56,59 |
| E | 13 | 19,18 | 3,33 | 4400 | 68,89 |
| E | 14 | 19,11 | 3,41 | 1600 | 24,55 |
| E | 15 | 20,12 | 4,15 | 6780 | 81,20 |
| E | 16 | 20,29 | 4,39 | 7300 | 81,96 |
| E | 17 | 19,03 | 3,49 | 3160 | 47,58 |
| E | 18 | 20,35 | 4,17 | 5890 | 69,41 |
| E | 19 | 19,15 | 3,62 | 3720 | 53,66 |
| E | 20 | 19,16 | 3,45 | 1120 | 16,94 |
| E | 21 | 19,52 | 4,43 | 4990 | 57,71 |
| E | 22 | 20,39 | 4,31 | 9230 | 105,03 |
| E | 23 | 20,27 | 3,74 | 5500 | 72,55 |

Přílohy

| | | | | | |
|-----------|----|--------|--------|----------|--------|
| E | 24 | 20,61 | 3,97 | 3440 | 42,04 |
| E | 25 | 19,16 | 3,49 | 4850 | 72,53 |
| E | 26 | 20,03 | 4,01 | 9620 | 119,77 |
| E | 27 | 19,3 | 3,27 | 4020 | 63,70 |
| E | 28 | 18,83 | 3,16 | 1480 | 24,87 |
| E | 29 | 19,84 | 4,21 | 3710 | 44,42 |
| F | 1 | 19,17 | 4,02 | 5580 | 72,41 |
| F | 2 | 19,38 | 3,76 | 3180 | 43,64 |
| F | 3 | 19,35 | 3,47 | 5400 | 80,42 |
| F | 4 | 18,75 | 3,99 | 8180 | 109,34 |
| F | 5 | 19,02 | 3,98 | 7770 | 102,64 |
| F | 6 | 19,84 | 3,46 | 8420 | 122,66 |
| F | 7 | 19,42 | 3,6 | 6810 | 97,41 |
| F | 8 | 19,23 | 3,94 | 2720 | 35,90 |
| F | 9 | 19,35 | 4,04 | 3060 | 39,14 |
| F | 10 | 19,19 | 3,65 | 6140 | 87,66 |
| F | 11 | 19,87 | 3,03 | 4120 | 68,43 |
| F | 12 | 20,05 | 3,46 | 4920 | 70,92 |
| F | 13 | 19,1 | 3,81 | 4530 | 62,25 |
| F | 14 | 19,41 | 4,06 | 4880 | 61,93 |
| F | 15 | 19,06 | 3,97 | 4890 | 64,62 |
| F | 16 | 19,26 | 3,81 | 4180 | 56,96 |
| F | 17 | 19,82 | 3,6 | 3240 | 45,41 |
| F | 18 | 19,8 | 3,64 | 5590 | 77,56 |
| F | 19 | 19,05 | 3,91 | 4130 | 55,45 |
| F | 20 | 19,88 | 3,52 | 4530 | 64,74 |
| F | 21 | 19,87 | 3,2 | 6740 | 106,00 |
| F | 22 | 18,91 | 3,63 | 4020 | 58,56 |
| F | 23 | 19,54 | 3,51 | 3440 | 50,16 |
| F | 24 | 19,64 | 3,32 | 5230 | 80,21 |
| F | 25 | 19,2 | 3,71 | 4950 | 69,49 |
| F | 26 | 19,66 | 2,86 | 3970 | 70,61 |
| F | 27 | 19,13 | 3,74 | 1950 | 27,26 |
| F | 28 | 19,24 | 4,18 | 4120 | 51,23 |
| F | 29 | 19,22 | 3,64 | 5620 | 80,33 |
| \bar{x} | - | 19,600 | 3,896 | 4499,591 | 64,738 |
| S_x | - | 0,430 | 0,535 | 2142,649 | 28,610 |
| V_x [%] | - | 2,196 | 13,730 | 47,619 | 44,194 |

* \bar{x} - aritmetický průměr, S_x – směrodatná odchylka, V_x – variační koeficient

Tab. 11.12: Hodnoty pevnosti dřeva ve smyku pro jednotlivé skupiny

| Skupina | n | Rozměr [mm] | | Hmotnost mw [g] | Síla F max [N] | Pevnost σ [Mpa] |
|---------|----|-------------|-------|-----------------------|----------------------|------------------------------|
| | | b | l | | | |
| A | 1 | 19,64 | 30,4 | 10,82 | 4320 | 7,24 |
| A | 2 | 19,5 | 32,3 | 8,96 | 3720 | 5,91 |
| A | 3 | 19,73 | 32,14 | 9,15 | 3300 | 5,20 |
| A | 4 | 19,52 | 31,91 | 10,97 | 4000 | 6,42 |
| A | 5 | 19,91 | 32,28 | 10,08 | 3660 | 5,69 |
| A | 6 | 19,43 | 32,27 | 10,56 | 3940 | 6,28 |
| A | 7 | 19,69 | 32,23 | 11,02 | 3580 | 5,64 |
| A | 8 | 19,43 | 30,34 | 10,58 | 3780 | 6,41 |
| A | 9 | 19,74 | 30,51 | 11,7 | 4160 | 6,91 |
| A | 10 | 19,81 | 32,04 | 10,97 | 3960 | 6,24 |
| A | 11 | 19,72 | 32,08 | 10,73 | 4180 | 6,61 |
| A | 12 | 19,79 | 30,54 | 9,89 | 3520 | 5,82 |
| A | 13 | 19,89 | 32,02 | 9,94 | 3700 | 5,81 |
| A | 14 | 19,76 | 31,96 | 9,23 | 3500 | 5,54 |
| A | 15 | 19,91 | 31,93 | 9,09 | 3700 | 5,82 |
| A | 16 | 19,55 | 31,86 | 10,52 | 3460 | 5,55 |
| A | 17 | 19,79 | 32,22 | 10,71 | 3640 | 5,71 |
| A | 18 | 19,7 | 31,98 | 11,05 | 4280 | 6,79 |
| A | 19 | 19,81 | 32,12 | 9,32 | 3480 | 5,47 |
| A | 20 | 19,59 | 32,13 | 10,55 | 3680 | 5,85 |
| A | 21 | 19,58 | 31,95 | 11,05 | 4420 | 7,07 |
| A | 22 | 19,66 | 31,93 | 10,82 | 4100 | 6,53 |
| A | 23 | 19,81 | 32,22 | 9,29 | 3560 | 5,58 |
| A | 24 | 19,54 | 32,25 | 10,11 | 4060 | 6,44 |
| A | 25 | 19,84 | 32,21 | 9,16 | 4180 | 6,54 |
| A | 26 | 19,98 | 32,07 | 10,86 | 3360 | 5,24 |
| A | 27 | 19,65 | 31,97 | 9,02 | 4140 | 6,59 |
| A | 28 | 19,78 | 31,93 | 8,94 | 3640 | 5,76 |
| A | 29 | 19,92 | 30,49 | 11,12 | 3860 | 6,36 |
| A | 30 | 19,46 | 31,97 | 10,02 | 3500 | 5,63 |
| B | 1 | 19,43 | 30,71 | 11,37 | 3260 | 5,46 |
| B | 2 | 19,7 | 30,73 | 12,72 | 4960 | 8,19 |
| B | 3 | 19,77 | 30,81 | 11,5 | 4240 | 6,96 |
| B | 4 | 18,88 | 30,09 | 11,51 | 3740 | 6,58 |
| B | 5 | 19,49 | 30,63 | 11,21 | 4480 | 7,50 |
| B | 6 | 19,55 | 30,64 | 11,91 | 4220 | 7,04 |
| B | 7 | 19,61 | 30,78 | 11,56 | 4940 | 8,18 |
| B | 8 | 19,63 | 31,03 | 11,84 | 4360 | 7,16 |
| B | 9 | 19,51 | 30,84 | 11,37 | 3760 | 6,25 |
| B | 10 | 19,58 | 31,09 | 12,99 | 5320 | 8,74 |
| B | 11 | 19,59 | 30,82 | 11,79 | 4540 | 7,52 |
| B | 12 | 19,77 | 30,65 | 12,23 | 3720 | 6,14 |
| B | 13 | 19,2 | 30,83 | 12,98 | 5060 | 8,55 |
| B | 14 | 19,72 | 30,76 | 11,81 | 4400 | 7,25 |

Přílohy

| | | | | | | |
|---|----|-------|-------|-------|------|-------|
| B | 15 | 19,62 | 30,9 | 12,46 | 4360 | 7,19 |
| B | 16 | 19,53 | 30,66 | 11,41 | 3620 | 6,05 |
| B | 17 | 19,58 | 31,26 | 11,93 | 4960 | 8,10 |
| B | 18 | 19,29 | 31,03 | 12,7 | 4100 | 6,85 |
| B | 19 | 19,66 | 30,2 | 11,43 | 3860 | 6,50 |
| B | 20 | 19,56 | 30,66 | 11,64 | 3900 | 6,50 |
| B | 21 | 19,61 | 30,74 | 12,79 | 5200 | 8,63 |
| B | 22 | 19,65 | 29,35 | 11,86 | 5080 | 8,81 |
| B | 23 | 19,62 | 30,23 | 12,4 | 4620 | 7,79 |
| B | 24 | 19,55 | 30,69 | 10,89 | 4320 | 7,20 |
| B | 25 | 19,33 | 31,02 | 11,89 | 4620 | 7,70 |
| B | 26 | 19,75 | 31,05 | 13,45 | 4480 | 7,31 |
| B | 27 | 19,85 | 31,02 | 16,52 | 6760 | 10,98 |
| B | 28 | 19,68 | 30,13 | 13,94 | 5780 | 9,75 |
| B | 29 | 19,19 | 31,06 | 12,23 | 3920 | 6,58 |
| B | 30 | 19,16 | 29,58 | 10,79 | 4160 | 7,34 |
| C | 1 | 19,69 | 30,77 | 10,24 | 4040 | 6,67 |
| C | 2 | 19,55 | 30,63 | 10,11 | 4380 | 7,31 |
| C | 3 | 19,51 | 30,82 | 10,32 | 4020 | 6,69 |
| C | 4 | 19,6 | 30,45 | 11,69 | 4080 | 6,84 |
| C | 5 | 19,6 | 30,51 | 10,31 | 4440 | 7,42 |
| C | 6 | 19,68 | 30,73 | 11,72 | 5440 | 9,00 |
| C | 7 | 19,81 | 30,9 | 11,24 | 4900 | 8,00 |
| C | 8 | 19,68 | 30,86 | 10,98 | 4220 | 6,95 |
| C | 9 | 19,67 | 30,67 | 10,53 | 4980 | 8,25 |
| C | 10 | 19,61 | 30,85 | 11,93 | 5960 | 9,85 |
| C | 11 | 19,63 | 30,83 | 10,19 | 4100 | 6,77 |
| C | 12 | 19,82 | 30,47 | 11,79 | 4660 | 7,72 |
| C | 13 | 19,74 | 30,65 | 11,5 | 4640 | 7,67 |
| C | 14 | 19,66 | 30,97 | 10,28 | 4140 | 6,80 |
| C | 15 | 19,91 | 30,66 | 12,14 | 4900 | 8,03 |
| C | 16 | 19,75 | 30,75 | 11,57 | 3980 | 6,55 |
| C | 17 | 19,61 | 30,18 | 12,43 | 4500 | 7,60 |
| C | 18 | 19,81 | 30,71 | 10,32 | 4720 | 7,76 |
| C | 19 | 19,83 | 30,45 | 10,61 | 4260 | 7,06 |
| C | 20 | 19,69 | 30,6 | 11,33 | 4500 | 7,47 |
| C | 21 | 19,56 | 30,89 | 10,9 | 3520 | 5,83 |
| C | 22 | 19,62 | 30,88 | 10,32 | 5040 | 8,32 |
| C | 23 | 19,73 | 30,61 | 10,11 | 3860 | 6,39 |
| C | 24 | 19,66 | 31,04 | 9,71 | 4260 | 6,98 |
| C | 25 | 19,62 | 30,81 | 10,74 | 4420 | 7,31 |
| C | 26 | 19,57 | 30,41 | 10,28 | 4080 | 6,86 |
| C | 27 | 19,62 | 31,13 | 11,96 | 2460 | 4,03 |
| C | 28 | 19,51 | 30,7 | 12,43 | 3700 | 6,18 |
| C | 29 | 19,75 | 30,63 | 11,98 | 6260 | 10,35 |
| C | 30 | 19,71 | 30,81 | 14,62 | 4680 | 7,71 |
| D | 1 | 19,78 | 30,69 | 12,37 | 3740 | 6,16 |
| D | 2 | 19,77 | 30,24 | 11,84 | 3780 | 6,32 |
| D | 3 | 19,89 | 30,36 | 12,87 | 4780 | 7,92 |
| D | 4 | 19,51 | 31,14 | 10,86 | 4740 | 7,80 |
| D | 5 | 19,89 | 30,63 | 11,24 | 4040 | 6,63 |

Přílohy

| | | | | | | |
|---|----|-------|-------|-------|------|-------|
| D | 6 | 19,71 | 30,44 | 11,88 | 5540 | 9,23 |
| D | 7 | 19,88 | 30,31 | 12,54 | 5560 | 9,23 |
| D | 8 | 19,87 | 30,14 | 11,13 | 5020 | 8,38 |
| D | 9 | 20,02 | 30,57 | 13,16 | 4980 | 8,14 |
| D | 10 | 19,86 | 30,04 | 12,14 | 4780 | 8,01 |
| D | 11 | 20,02 | 30,1 | 12,12 | 4020 | 6,67 |
| D | 12 | 19,93 | 30,61 | 11,24 | 3660 | 6,00 |
| D | 13 | 19,87 | 30,71 | 12 | 4540 | 7,44 |
| D | 14 | 19,98 | 30,37 | 11,24 | 5000 | 8,24 |
| D | 15 | 19,94 | 30,95 | 10,94 | 4720 | 7,65 |
| D | 16 | 19,69 | 30,48 | 12,07 | 3660 | 6,10 |
| D | 17 | 20,01 | 30,5 | 12,31 | 5680 | 9,31 |
| D | 18 | 19,8 | 30,62 | 12,18 | 3920 | 6,47 |
| D | 19 | 19,94 | 30,36 | 10,91 | 4440 | 7,33 |
| D | 20 | 19,98 | 30,21 | 12,75 | 4940 | 8,18 |
| D | 21 | 19,93 | 30,66 | 12,95 | 5460 | 8,94 |
| D | 22 | 19,91 | 31,13 | 11,1 | 5020 | 8,10 |
| D | 23 | 19,8 | 30,79 | 11,01 | 4760 | 7,81 |
| D | 24 | 19,91 | 30,24 | 12,02 | 3660 | 6,08 |
| D | 25 | 19,92 | 30,49 | 9,17 | 3940 | 6,49 |
| D | 26 | 20,02 | 30,39 | 9 | 4420 | 7,26 |
| D | 27 | 19,7 | 30,74 | 11,84 | 4420 | 7,30 |
| D | 28 | 19,72 | 30,5 | 10,97 | 4740 | 7,88 |
| D | 29 | 20,05 | 30,56 | 13,19 | 6820 | 11,13 |
| D | 30 | 19,85 | 30,57 | 14,67 | 6660 | 10,98 |
| E | 1 | 19,7 | 30,58 | 9,53 | 4720 | 7,83 |
| E | 2 | 19,31 | 30,47 | 9,69 | 4420 | 7,51 |
| E | 3 | 19,69 | 30,8 | 10,44 | 4140 | 6,83 |
| E | 4 | 19,7 | 30,4 | 11,03 | 2060 | 3,44 |
| E | 5 | 19,41 | 30,61 | 10,42 | 3700 | 6,23 |
| E | 6 | 19,56 | 30,48 | 9,57 | 4420 | 7,41 |
| E | 7 | 19,77 | 30,72 | 8,96 | 3320 | 5,47 |
| E | 8 | 19,67 | 30,68 | 9,07 | 4180 | 6,93 |
| E | 9 | 19,82 | 30,45 | 9,92 | 4560 | 7,56 |
| E | 10 | 19,48 | 30,49 | 10,54 | 3940 | 6,63 |
| E | 11 | 19,58 | 30,81 | 9,57 | 3420 | 5,67 |
| E | 12 | 19,63 | 30,72 | 10,87 | 4120 | 6,83 |
| E | 13 | 19,69 | 30,62 | 10,04 | 3620 | 6,00 |
| E | 14 | 19,6 | 30,39 | 10,96 | 6140 | 10,31 |
| E | 15 | 19,42 | 30,63 | 10,33 | 3420 | 5,75 |
| E | 16 | 19,76 | 30,49 | 10,38 | 3500 | 5,81 |
| E | 17 | 19,69 | 30,68 | 9,07 | 3980 | 6,59 |
| E | 18 | 19,72 | 30,43 | 10,45 | 4200 | 7,00 |
| E | 19 | 19,61 | 30,65 | 10,88 | 4160 | 6,92 |
| E | 20 | 19,46 | 30,36 | 10,4 | 3560 | 6,03 |
| E | 21 | 19,89 | 30,44 | 9,5 | 2660 | 4,39 |
| E | 22 | 19,5 | 30,51 | 10,04 | 2800 | 4,71 |
| E | 23 | 19,67 | 30,8 | 11,37 | 3320 | 5,48 |
| E | 24 | 19,72 | 30,7 | 10,61 | 4380 | 7,23 |
| E | 25 | 19,62 | 30,61 | 9,81 | 4120 | 6,86 |
| E | 26 | 19,45 | 30,64 | 10,69 | 4720 | 7,92 |

Přílohy

| | | | | | | |
|-----------|----|--------|--------|--------|----------|--------|
| E | 27 | 19,55 | 30,47 | 10,41 | 4740 | 7,96 |
| E | 28 | 19,62 | 30,71 | 11,05 | 4660 | 7,73 |
| E | 29 | 19,57 | 30,27 | 11,17 | 4380 | 7,39 |
| E | 30 | 19,32 | 30,55 | 12,91 | 6000 | 10,17 |
| F | 1 | 18,63 | 29,87 | 9,12 | 2940 | 5,28 |
| F | 2 | 19,79 | 29,98 | 9,85 | 3520 | 5,93 |
| F | 3 | 19,45 | 29,66 | 10,78 | 4240 | 7,35 |
| F | 4 | 19,7 | 30,29 | 11,29 | 3560 | 5,97 |
| F | 5 | 19,85 | 29,78 | 11,97 | 4560 | 7,71 |
| F | 6 | 19,43 | 29,94 | 10,12 | 3560 | 6,12 |
| F | 7 | 19,73 | 30,02 | 10,98 | 4700 | 7,94 |
| F | 8 | 19,85 | 30,04 | 10,35 | 3540 | 5,94 |
| F | 9 | 19,2 | 29,88 | 9,67 | 3820 | 6,66 |
| F | 10 | 19,46 | 29,78 | 11,66 | 5060 | 8,73 |
| F | 11 | 20,02 | 29,84 | 14,06 | 5060 | 8,47 |
| F | 12 | 19,68 | 30,1 | 12,9 | 5040 | 8,51 |
| F | 13 | 19,79 | 29,8 | 13,6 | 5520 | 9,36 |
| F | 14 | 19,62 | 30,09 | 12,16 | 4500 | 7,62 |
| F | 15 | 19,94 | 30,11 | 12,61 | 4180 | 6,96 |
| F | 16 | 19,81 | 29,91 | 13,4 | 5600 | 9,45 |
| F | 17 | 19,72 | 29,74 | 11,16 | 4180 | 7,13 |
| F | 18 | 19,66 | 30,18 | 10,28 | 3640 | 6,13 |
| F | 19 | 19,9 | 29,78 | 11,11 | 4360 | 7,36 |
| F | 20 | 19,42 | 29,92 | 11,64 | 4220 | 7,26 |
| F | 21 | 19,75 | 29,84 | 10,69 | 3960 | 6,72 |
| F | 22 | 19,82 | 29,79 | 11,33 | 4220 | 7,15 |
| F | 23 | 19,94 | 30 | 12,69 | 4740 | 7,92 |
| F | 24 | 19,82 | 30,14 | 12,79 | 4620 | 7,73 |
| F | 25 | 19,53 | 29,94 | 11,47 | 3700 | 6,33 |
| F | 26 | 19,7 | 30,03 | 10,71 | 4480 | 7,57 |
| F | 27 | 18,94 | 29,9 | 10,88 | 3640 | 6,43 |
| F | 28 | 19,86 | 29,88 | 11,98 | 4260 | 7,18 |
| F | 29 | 19,7 | 30,02 | 10,37 | 3680 | 6,22 |
| F | 30 | 19,33 | 30,01 | 12,05 | 4780 | 8,24 |
| \bar{x} | - | 19,671 | 30,703 | 11,182 | 4294,111 | 7,116 |
| S_x | - | 0,211 | 0,656 | 1,246 | 747,954 | 1,263 |
| V_x [%] | - | 1,071 | 2,137 | 11,145 | 17,418 | 17,743 |

* \bar{x} - aritmetický průměr, S_x – směrodatná odchylka, V_x – variační koeficient

Tab. 11.13: Hodnoty pevnosti dřeva ve statickém ohybu pro jednotlivé dřeviny

| Skupina | Rozměr [mm] | | | | Hmotnost mw [g] | Síla F max [N] | Pevnost σ [Mpa] | Hustota ρ [kg.m ⁻³] |
|---------|-------------|-------|-------|--------|-----------------|----------------|------------------------|--------------------------------------|
| | n | b | h | dl max | | | | |
| A | 1 | 19,67 | 18,95 | 6,1 | 45,74 | 1380 | 70,33 | 409,036 |
| A | 2 | 19,23 | 19,82 | 6,685 | 49,02 | 1450 | 69,10 | 428,715 |
| A | 3 | 19,25 | 19,66 | 7,095 | 49,6 | 1468 | 71,03 | 436,864 |
| A | 4 | 19,77 | 19,15 | 2,339 | 46,93 | 922 | 45,78 | 413,194 |
| A | 5 | 20,02 | 19,27 | 6,926 | 45,68 | 1249 | 60,48 | 394,693 |
| A | 6 | 20,18 | 19,14 | 4,76 | 44,7 | 1192 | 58,05 | 385,765 |
| A | 7 | 20,03 | 19,24 | 5,78 | 49,44 | 1381 | 67,05 | 427,633 |
| A | 8 | 19,91 | 19,18 | 6,027 | 48,34 | 1433 | 70,43 | 421,954 |
| A | 9 | 19,94 | 19,42 | 5,833 | 47,55 | 1356 | 64,91 | 409,312 |
| A | 10 | 20,11 | 19,39 | 4,698 | 50,33 | 1329 | 63,28 | 430,245 |
| A | 11 | 20,04 | 19,31 | 6,013 | 42,6 | 1306 | 62,92 | 366,951 |
| A | 12 | 19,9 | 19,22 | 5,084 | 45,9 | 1371 | 67,14 | 400,023 |
| A | 13 | 19,37 | 19,21 | 7,582 | 48,97 | 1604 | 80,78 | 438,684 |
| A | 14 | 19,29 | 19,92 | 5,441 | 49,77 | 1361 | 64,01 | 431,743 |
| A | 15 | 19,42 | 19,69 | 7,005 | 48,73 | 1408 | 67,32 | 424,796 |
| A | 16 | 20,02 | 20,06 | 7,242 | 47,93 | 1415 | 63,23 | 397,824 |
| A | 17 | 19,6 | 19,18 | 7,776 | 45,36 | 1435 | 71,65 | 402,205 |
| A | 18 | 19,86 | 19,28 | 4,48 | 48,82 | 1229 | 59,93 | 425,001 |
| A | 19 | 19,43 | 19,52 | 5,59 | 40,72 | 1085 | 52,76 | 357,877 |
| A | 20 | 19,29 | 19,19 | 11,152 | 46,93 | 637 | 32,28 | 422,593 |
| A | 21 | 19,15 | 20,03 | 8,536 | 48,93 | 1487 | 69,68 | 425,211 |
| A | 22 | 19,8 | 19,25 | 6,281 | 48,23 | 1459 | 71,59 | 421,794 |
| A | 23 | 20,15 | 19,43 | 3,775 | 44,49 | 1072 | 50,73 | 378,785 |
| A | 24 | 19,48 | 20,08 | 5,318 | 47,35 | 1405 | 64,40 | 403,502 |
| C | 1 | 20,35 | 18,85 | 7,273 | 49,8 | 1555 | 77,42 | 432,745 |
| C | 2 | 18,84 | 19,9 | 6,634 | 54,84 | 1534 | 74,02 | 487,576 |
| C | 3 | 19,13 | 18,81 | 6,515 | 45,86 | 1289 | 68,56 | 424,824 |
| C | 4 | 18,9 | 20,01 | 6,331 | 46,37 | 1336 | 63,56 | 408,702 |
| C | 5 | 20,02 | 18,92 | 6,095 | 51,15 | 1398 | 70,23 | 450,131 |
| C | 6 | 20,07 | 18,93 | 6,478 | 45,68 | 1224 | 61,27 | 400,781 |
| C | 7 | 19,97 | 18,73 | 7,241 | 50,31 | 1701 | 87,41 | 448,350 |
| C | 8 | 19,82 | 18,32 | 6,306 | 50 | 1534 | 83,02 | 459,007 |
| C | 9 | 19,81 | 18,78 | 6,426 | 51,37 | 1469 | 75,69 | 460,265 |
| C | 10 | 19,63 | 18,67 | 4,838 | 49,75 | 1443 | 75,92 | 452,488 |
| C | 11 | 19,87 | 19,94 | 5,693 | 49,92 | 1373 | 62,56 | 419,982 |
| C | 12 | 19,75 | 18,65 | 4,179 | 49,64 | 1428 | 74,84 | 449,226 |
| C | 13 | 19,82 | 18,66 | 7,738 | 51,36 | 1753 | 91,44 | 462,901 |
| C | 14 | 19,91 | 18,87 | 6,438 | 47,86 | 1220 | 61,95 | 424,628 |
| C | 15 | 20,02 | 19,17 | 5,518 | 46,71 | 1027 | 50,25 | 405,698 |
| C | 16 | 19,7 | 18,61 | 6,428 | 55,34 | 1816 | 95,82 | 503,159 |
| C | 17 | 18,64 | 19,7 | 7,7 | 47,42 | 1209 | 60,17 | 430,455 |
| C | 18 | 20,04 | 18,71 | 6,558 | 50,2 | 1445 | 74,15 | 446,284 |
| C | 19 | 19,7 | 18,72 | 7,815 | 50,99 | 1605 | 83,70 | 460,884 |
| C | 20 | 19,75 | 18,84 | 6,888 | 50,21 | 1597 | 82,01 | 449,802 |
| C | 21 | 19,81 | 18,67 | 6,081 | 49,8 | 1478 | 77,06 | 448,827 |

Přílohy

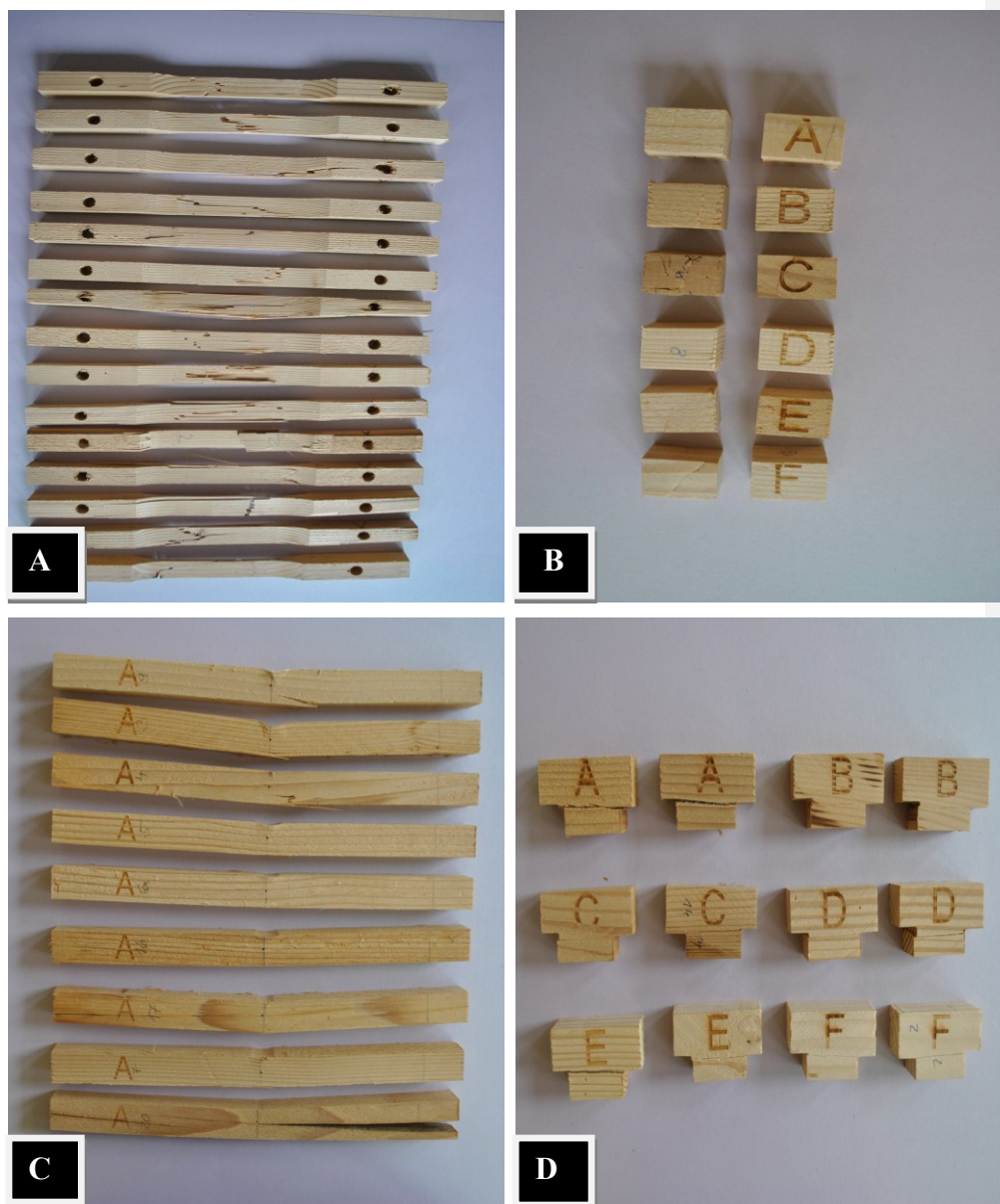
| | | | | | | | | |
|---|----|-------|-------|--------|-------|------|-------|---------|
| C | 22 | 19,97 | 18,51 | 6,987 | 50,34 | 1205 | 63,40 | 453,949 |
| C | 23 | 20,27 | 18,64 | 6,206 | 54,37 | 1569 | 80,20 | 479,665 |
| C | 24 | 19,74 | 18,52 | 7,225 | 47,1 | 1480 | 78,69 | 429,449 |
| C | 25 | 19,91 | 18,66 | 6,168 | 55,31 | 1808 | 93,89 | 496,249 |
| C | 26 | 19,79 | 18,63 | 7,753 | 49,42 | 1692 | 88,68 | 446,810 |
| C | 27 | 19,06 | 20,14 | 7,284 | 45,95 | 1295 | 60,30 | 399,008 |
| C | 28 | 19,9 | 18,69 | 7,659 | 57,15 | 1716 | 88,87 | 512,192 |
| C | 29 | 19,97 | 18,73 | 7,656 | 55,89 | 1043 | 53,60 | 498,078 |
| D | 1 | 20,03 | 20,08 | 6,685 | 59,62 | 2190 | 97,62 | 494,113 |
| D | 2 | 20,18 | 19,84 | 2,938 | 47,65 | 983 | 44,55 | 396,715 |
| D | 3 | 19,93 | 19,67 | 5,576 | 62,2 | 1579 | 73,72 | 528,880 |
| D | 4 | 19,89 | 19,82 | 5,12 | 59,4 | 1598 | 73,63 | 502,258 |
| D | 5 | 19,9 | 19,54 | 6,687 | 57,45 | 1671 | 79,17 | 492,483 |
| D | 6 | 19,8 | 19,91 | 7,061 | 55,9 | 1714 | 78,62 | 472,666 |
| D | 7 | 19,84 | 19,91 | 4,615 | 54,55 | 1543 | 70,63 | 460,321 |
| D | 8 | 19,65 | 19,93 | 6,9 | 50,31 | 1721 | 79,38 | 428,216 |
| D | 9 | 19,91 | 19,76 | 7,213 | 57,26 | 1589 | 73,58 | 485,145 |
| D | 10 | 19,83 | 19,89 | 5,386 | 51,96 | 1385 | 63,56 | 439,127 |
| D | 11 | 19,99 | 19,96 | 5,899 | 51,27 | 1518 | 68,62 | 428,320 |
| D | 12 | 20,22 | 19,73 | 10,198 | 50,09 | 1495 | 68,38 | 418,525 |
| D | 13 | 19,82 | 19,86 | 4,965 | 59,16 | 1890 | 87,04 | 500,984 |
| D | 14 | 20,32 | 19,82 | 3,787 | 47,7 | 864 | 38,97 | 394,793 |
| D | 15 | 19,78 | 19,81 | 4,512 | 49,48 | 1485 | 68,87 | 420,918 |
| D | 16 | 19,79 | 20,15 | 9,62 | 52,7 | 914 | 40,95 | 440,523 |
| D | 17 | 20,04 | 19,98 | 5,61 | 50,86 | 997 | 44,87 | 423,411 |
| D | 18 | 20,11 | 19,88 | 6,374 | 57,99 | 1673 | 75,78 | 483,508 |
| D | 19 | 19,79 | 19,86 | 6,062 | 58,63 | 1880 | 86,71 | 497,249 |
| D | 20 | 19,9 | 19,93 | 4,023 | 46,2 | 816 | 37,16 | 388,294 |
| D | 21 | 19,82 | 20,17 | 5,649 | 52,71 | 1532 | 68,40 | 439,503 |
| D | 22 | 19,76 | 19,92 | 6,451 | 53,87 | 1653 | 75,89 | 456,194 |
| D | 23 | 19,84 | 19,67 | 7,826 | 44,54 | 1410 | 66,13 | 380,437 |
| D | 24 | 20,01 | 19,92 | 5,915 | 56,45 | 1650 | 74,81 | 472,070 |
| D | 25 | 19,76 | 19,79 | 4,931 | 53,47 | 1510 | 70,24 | 455,781 |
| D | 26 | 20,22 | 19,61 | 11,897 | 52,66 | 862 | 39,91 | 442,691 |
| D | 27 | 19,85 | 19,81 | 4,434 | 54,72 | 1319 | 60,96 | 463,852 |
| D | 28 | 19,86 | 19,78 | 3,511 | 58,86 | 1444 | 66,90 | 499,452 |
| D | 29 | 19,92 | 19,72 | 3,388 | 52,88 | 1012 | 47,03 | 448,718 |
| E | 1 | 19,69 | 19,36 | 7,408 | 47,83 | 1354 | 66,05 | 418,242 |
| E | 2 | 19,96 | 19,57 | 5,489 | 49,11 | 1286 | 60,56 | 419,080 |
| E | 3 | 19,58 | 18,98 | 4,893 | 45,61 | 1186 | 60,53 | 409,100 |
| E | 4 | 19,84 | 19,36 | 5,208 | 49,78 | 1336 | 64,68 | 432,003 |
| E | 5 | 19,73 | 19,52 | 5,776 | 46,3 | 1301 | 62,30 | 400,731 |
| E | 6 | 19,85 | 19,37 | 4,954 | 48,51 | 738 | 35,67 | 420,552 |
| E | 7 | 19,15 | 19,52 | 4,582 | 47,54 | 1136 | 56,05 | 423,925 |
| E | 8 | 19,74 | 18,76 | 6,658 | 45,57 | 1195 | 61,92 | 410,183 |
| E | 9 | 20,02 | 19,58 | 5,004 | 50,38 | 1286 | 60,32 | 428,411 |
| E | 10 | 19,96 | 19,27 | 4,134 | 45,23 | 1020 | 49,54 | 391,979 |
| E | 11 | 19,27 | 19,23 | 5,962 | 51,02 | 1351 | 68,25 | 458,942 |
| E | 12 | 19,74 | 19,12 | 5,893 | 43,94 | 1078 | 53,78 | 388,064 |
| E | 13 | 19,9 | 19,2 | 4,862 | 44,8 | 1021 | 50,10 | 390,843 |
| E | 14 | 19,13 | 19,58 | 6,229 | 52,27 | 1311 | 64,35 | 465,161 |
| E | 15 | 19,76 | 19,44 | 5,657 | 49,31 | 1315 | 63,39 | 427,888 |
| E | 16 | 19,56 | 18,89 | 4,487 | 45,7 | 1157 | 59,68 | 412,282 |

Přílohy

| | | | | | | | | |
|-----------|----|--------|--------|--------|--------|-------|--------|---------|
| E | 17 | 19,94 | 19,51 | 4,827 | 47,73 | 1135 | 53,83 | 408,967 |
| E | 18 | 19,71 | 19,22 | 5,207 | 49,02 | 1241 | 61,36 | 431,332 |
| E | 19 | 19,61 | 19,43 | 4,157 | 48,05 | 1062 | 51,64 | 420,360 |
| E | 20 | 19,18 | 19,68 | 5,684 | 46,74 | 782 | 37,90 | 412,756 |
| E | 21 | 19,72 | 19,26 | 3,808 | 46,05 | 993 | 48,87 | 404,152 |
| E | 22 | 19,78 | 19,24 | 3,273 | 47,98 | 841 | 41,35 | 420,250 |
| E | 23 | 19,37 | 19,61 | 6,775 | 50,98 | 1423 | 68,77 | 447,375 |
| E | 24 | 19,63 | 19,24 | 6,038 | 47,92 | 1264 | 62,62 | 422,932 |
| E | 25 | 19,57 | 19,05 | 4,494 | 49,18 | 1043 | 52,87 | 439,725 |
| E | 26 | 19,69 | 19,3 | 6,407 | 46,16 | 1470 | 72,15 | 404,894 |
| E | 27 | 19,16 | 19,68 | 6,962 | 49,8 | 1282 | 62,19 | 440,238 |
| E | 28 | 19,57 | 19,32 | 3,913 | 48,05 | 841 | 41,45 | 423,618 |
| E | 29 | 19,81 | 19,11 | 6,906 | 47,23 | 1239 | 61,65 | 415,864 |
| F | 1 | 19,74 | 19,71 | 5,984 | 55,6 | 1948 | 91,45 | 476,343 |
| F | 2 | 19,77 | 19,63 | 4,161 | 45,17 | 1214 | 57,37 | 387,973 |
| F | 3 | 19,29 | 19,63 | 4,223 | 49,87 | 1324 | 64,12 | 439,001 |
| F | 4 | 19,06 | 19,59 | 8,116 | 47,9 | 1676 | 82,49 | 427,619 |
| F | 5 | 19,54 | 19,61 | 4,581 | 47,01 | 1433 | 68,65 | 408,947 |
| F | 6 | 19,77 | 19,88 | 5,617 | 57,89 | 1480 | 68,19 | 490,975 |
| F | 7 | 19,85 | 19,72 | 4,234 | 49,68 | 1714 | 79,94 | 423,051 |
| F | 8 | 19,51 | 18,98 | 4,745 | 51,54 | 1250 | 64,03 | 463,948 |
| F | 9 | 19,82 | 20,24 | 5,623 | 61,09 | 1299 | 57,60 | 507,615 |
| F | 10 | 19,64 | 19,53 | 6,191 | 54,21 | 2110 | 101,40 | 471,101 |
| F | 11 | 19,72 | 19,45 | 3,608 | 54,2 | 1269 | 61,24 | 471,033 |
| F | 12 | 19,81 | 19,7 | 5,982 | 61,22 | 1986 | 93,00 | 522,903 |
| F | 13 | 19,58 | 19,75 | 5,279 | 51,91 | 1338 | 63,07 | 447,456 |
| F | 14 | 19,51 | 19,72 | 7,232 | 54,63 | 1590 | 75,44 | 473,310 |
| F | 15 | 19,62 | 19,64 | 4,93 | 50,44 | 1310 | 62,31 | 436,328 |
| F | 16 | 19,56 | 19,65 | 6,817 | 57,31 | 1801 | 85,85 | 497,024 |
| F | 17 | 19,81 | 19,67 | 3,11 | 58,72 | 1262 | 59,27 | 502,315 |
| F | 18 | 19,35 | 19,67 | 5,548 | 50,11 | 1224 | 58,86 | 438,852 |
| F | 19 | 19,89 | 19,79 | 8,787 | 49,23 | 1041 | 48,11 | 416,896 |
| F | 20 | 19,79 | 19,13 | 6,878 | 49,42 | 1216 | 60,44 | 435,132 |
| F | 21 | 19,9 | 19,73 | 5,3 | 52,69 | 1711 | 79,51 | 447,329 |
| F | 22 | 19,72 | 19,58 | 4,428 | 46,33 | 1346 | 64,09 | 399,965 |
| F | 23 | 19,67 | 19,83 | 6,009 | 53,98 | 117 | 5,45 | 461,301 |
| F | 24 | 19,62 | 19,61 | 7,093 | 50,07 | 1294 | 61,74 | 433,790 |
| F | 25 | 19,68 | 19,9 | 6,935 | 60,99 | 2047 | 94,56 | 519,110 |
| F | 26 | 19,8 | 19,36 | 5,382 | 47,35 | 1180 | 57,24 | 411,745 |
| F | 27 | 19,83 | 20,02 | 1,569 | 60,3 | 214 | 9,69 | 506,302 |
| F | 28 | 19,16 | 19,74 | 7,777 | 47,6 | 1175 | 56,66 | 419,511 |
| F | 29 | 19,77 | 20,18 | 4,288 | 67,81 | 747 | 33,40 | 566,558 |
| \bar{x} | - | 19,730 | 19,445 | 5,921 | 50,606 | 1346 | 65,133 | 439,607 |
| S_x | - | 0,304 | 0,447 | 1,553 | 4,609 | 319,6 | 15,597 | 36,879 |
| V_x [%] | - | 1,539 | 2,299 | 26,234 | 9,109 | 23,73 | 23,946 | 8,389 |

* \bar{x} - aritmetický průměr, S_x – směrodatná odchylka, V_x – variační koeficient

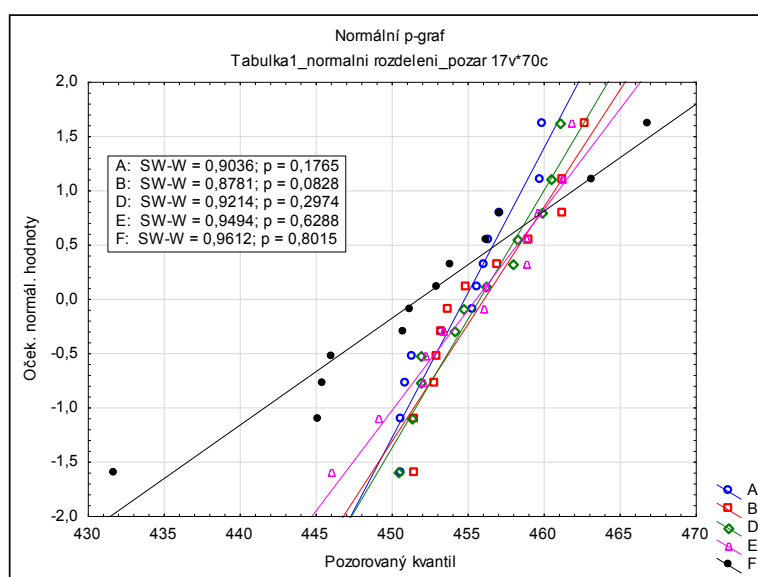
Fotodokumentace zkušebních těles (obr. 11.1) po zatížení v tlaku (A), tahu (B), smyku (C) a ohybu (D).



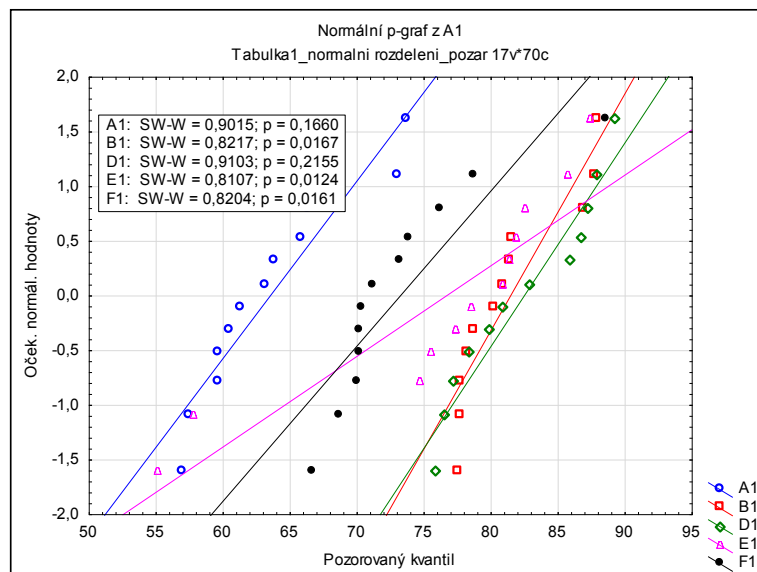
Obr. 11.1: Fotodokumentace zkušebních těles z jednotlivých skupin po zatížení v tlaku, tahu, smyku a ohybu

11.4 Statistické úpravy pro data analyzující vliv věku na tepelnou degradaci dřeva

Pro hodnoty hustot a úbytku na hmotnosti pro věky A až F byly provedeny testy normálního rozdělení souboru dat. Testy byly provedeny pomocí Shapiro-Wilkova testu normálního rozdělení souborů. Výsledky jsou uvedeny na obr. 11.2 pro hustoty vzorků A - F a na obr. 11.3 pro úbytky na hmotnosti A - F.

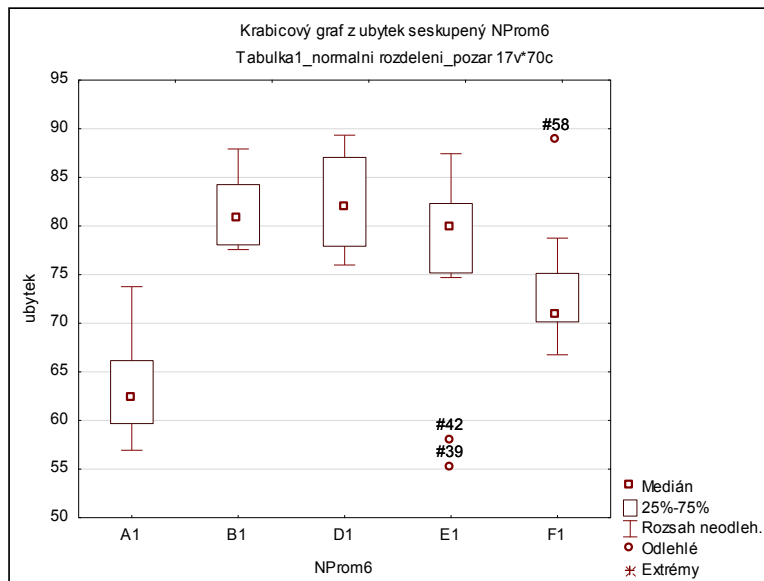


Obr. 11.2: Shapiro- Wilkův test normálního rozdělení pro hustoty skupin A – F



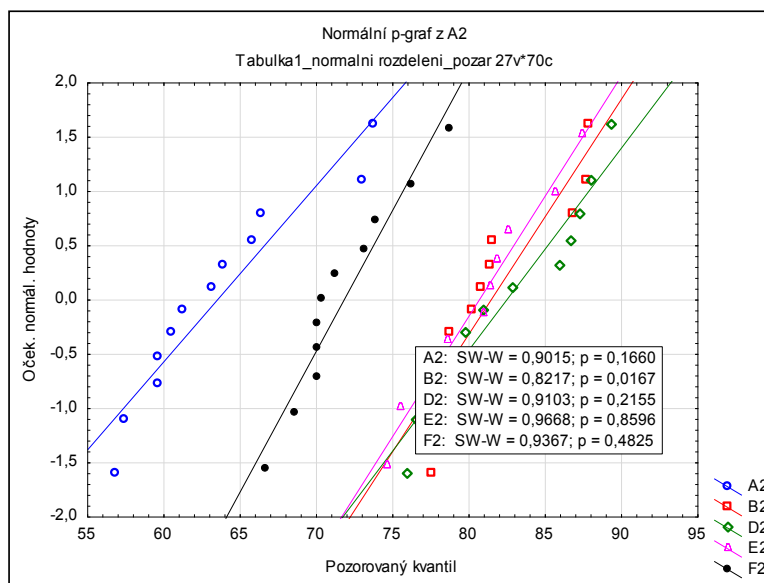
Obr. 11.3: Shapiro- Wilkův test normálního rozdělení pro úbytky na hmotnosti skupiny A - F

U obr. 11.2 je patrné, že soubor vysokých hustot pro skupiny A - F vykazuje normální rozdělení na hladině významnosti α . P hodnota je v obou případech vyšší než obvyklá hodnota $\alpha = 0,05$, což značí, že nulová hypotéza o tom, že výběr pochází ze základního souboru s normálním rozdělením, nemůže být zamítnuta. Pracujeme tedy s předpokladem, že výběr pochází ze základního souboru s normálním rozdělením. Na obr. 11.3 je zřejmé, že soubor úbytků hmotnosti pro skupiny A - F nevykazuje normální rozdělení na hladině významnosti α . P hodnota je v případě skupiny B, E a F nižší než obvyklá hodnota $\alpha = 0,05$, což značí, že nulová hypotéza o tom, že výběr pochází ze základního souboru s normálním rozdělením, je zamítnuta. Skupina A vykazuje normalitu souboru. U skupiny B, E a F je nutné zjistit, které hodnoty, extrémní nebo odlehlé, ovlivňují data souboru natolik, že způsobují nenormální rozdělení dat. V případě, že důvodem jsou odlehlé hodnoty, se tyto odstraní. V případě, že i poté nebude dosaženo normality souboru, je nutné provést transformaci dat celého souboru.



Obr. 11.4: Box-plot graf s vyznačenými odlehlými hodnotami ve skupinách E a F

Z krabicového grafu (obr. 11.4) je patrný odlehlý bod číslo 42 a 39 u skupiny E a bod číslo 58 u skupiny F. V tabulce 5 a 6 jsou tyto hodnoty odstraněny. Po odstranění odlehlých hodnot soubory skupiny E a F vykazují normální rozdělení, obr. 11.5.



Obr. 11.5: Shapiro- Wilkův test normálního rozdělení po odstranění extrémních hodnot